

TERÄSPUTKIPAALUT



TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS

SILLANSUUNNITTELU

TVH 723448

HELSINKI 1989

08
T/E



89 0768

TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS
VASTUUYKSIKKÖ
Suunnitteluosasto
Sillansuunnittelu

MÄÄRÄYS

OHJE X MUU OHJAUS
NRO Sss-205

PVM
16.6.1989

ASIARYHMÄ
C.2.3.1

SÄÄDÖSPERUSTA TL 117 §

KORVAA

KOHDISTUVUUS

TVH x PIIRIHALLINTO x MUU VALT.HALLINTO ULKOPUOLISET

VASTAANOTTAJA
Jakelussa mainitut
VOIMASSA
1.7.1989 - 30.6.1992

Teräspankipaalut

Oheisena lähetetään koekäyttöön ohje Teräspankipaalut, TVH 723448, joka on tarkoitettu käytettäväksi siltojen teräspankipaalutusten suunnittelussa ja rakentamisessa.

Ohje koskee paaluja joiden halkaisija on ≥ 300 mm. Siten se täydentää Lyöntipaaluohjeiden (LPO -87) teräspanpaluja käsittelevää osaa. Niiden paalujen osalta, joissa teräspanputki toimii vain valumuottina, ohje täydentää Suurpaaluohjeita (SPO -78).

Ohjeen soveltamista on selvitetty Siltojen pohjarakennusohjeessa, TVH 722068.

Ohje tulee koekäyttöön 30.6.1992 asti. Sen jälkeen siihen tehdään käyttökokemusten perusteella tarpeellisiksi katsotut muutokset.

Apulaisjohtaja

Yrjö Havukainen
Yrjö Havukainen

Diplomi-insinööri

Matti Kuusivaara
Matti Kuusivaara

JAKELU: Tie- ja vesirakennuspiirit
S, Skk, Sts, T, Tg, Tt
Sss:n teknillinen henkilökunta
Kirjasto
Kirjasto/Ohjeluetelo C.2.3.1
TVL:n ulkopuolinen jakelu/Luettelo

LISÄTIETOJA
Esko Palmu
TVH/Sss
p. 1542388

LISÄJAKELU
TVH:n lomakevarasto
PL 33, 00521 Helsinki
p. 1542052

TERÄSPUTKIPAALUT

Tie- ja vesirakennushallitus
Sillansuunnittelu
TVH 723448

Helsinki 1989

Hakaniemen Valtimo
1989

ISBN 951-47-1613-2

ALKULAUSE

Siltojen perustamisratkaisuiksi suunnitellaan ja tarjotaan lisääntyvässä määrin teräsputkipaaluja, jolloin putkipaalujen suunnitteluohjeiden tarve on ilmeinen. Puutteen korjaamiseksi TVH:n sillansuunnittelutoimiston aloitteesta muodostettiin 1987 putkipaaluryhmä, johon ovat kuuluneet dipl.ins. Matti Huuskonen 31.3.1989 asti ja dipl.ins. Matti Kuusivaara 1.4.1989 alkaen TVH:n sillansuunnittelusta puheenjohtajina, dipl.ins. Matti Kolhinen TVH:n geopalvelukeskuksesta, dipl.ins. Jouko Lämsä TVH:n teknisistä palveluista, dipl.ins. Ilkka Sorsa Rautaruukki Oy:n putkiryhmästä, prof. Jorma Hartikainen, dipl.ins. Aki Hyrkkönen, dipl.ins. Mauri Koskinen TTKK:n geotekniikan laitokselta ja insinööri Esko Palmu TVH:n sillansuunnittelusta sihteerinä.

Ohjeluonnoksen kirjoitustyön on tehnyt GT-Geotieto Oy konsulttityönä. Pääosan kirjoitustyöstä on tehnyt Aki Hyrkkönen TVH:n ja Rautaruukki Oy:n rahoittaman diplomityönsä "Suurten teräsputkipaalujen geotekninen kantavuus" perusteella. Kirjoitustyöhön ovat osallistuneet myös Jorma Hartikainen, Mauri Koskinen ja Ilkka Sorsa.

Tämä tulee koekäyttöön 30.6.1992 asti.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	OHJEIDEN SOVELLUSALUE JA LIITTYMINEN MUIHIN OHJEISIIN	9
2.	POHJATUTKIMUKSET	10
2.1	Yleisvaatimukset	10
2.2	Paalujen toimintatavan vaikutus	10
2.21	Tukipaalut	10
2.22	Kitkapaalut	10
2.23	Sivukuormitetut paalut	11
2.24	Vetopaalut	11
2.25	Negatiivinen vaippahankaus	11
2.26	Teräspaalujen aiheuttamat erityisvaatimukset	12
3.	TERÄSPUTKIPAALUJEN VALINTAPERUSTEET	13
3.1	Paalujen toimintatapa	13
3.11	Tukipaalu	13
3.12	Kitkapaalu	14
3.13	Koheesiopaalu	15
3.2	Erilaisissa pohjasuhteissa ja ympäristö- olosuhteissa soveltuvat paalutyypit	15
3.21	Suljetut paalut	16
3.211	Kalliokärjellä varustetut paalut	16
3.212	Pohjalevyllä varustetut paalut	17
3.213	Betonitulpalla varustetut paalut	17
3.22	Avoimet paalut	18
3.221	Tulppaava paalu	18
3.222	Tulppaantumaton paalu	19
3.23	Teräskuorellinen betonipaalu	20
3.3	Paalutuksen ympäristövaikutukset	20
3.31	Maan syrjäytymisestä aiheutuvat haitat	20
3.311	Maanpinnan painuminen	20
3.312	Maakerrosten vaakasiirtymät ja maanpinnan kohoaminen	21
3.313	Huokosvedenpaineen kasvu	22
3.314	Maakerrosten häiriintyminen	22
3.32	Tärinävauriot	22

3.321	Paalutuksen aiheuttama värinä	22
3.322	Tärinätason valvonta ja alentaminen	23
3.33	Meluhaitat	24
3.331	Paalutuksesta aiheutuva melutaso	24
3.332	Melutason pienentäminen ja valvonta	24
4.	GEOTEKNINEN KANTAVUUS	25
4.1	Kantavuuden määrittystavat	25
4.11	Staattiset kantavuuskaavat	26
4.111	Kärkivastus homogeenisessä kitkamaakerroksessa	27
4.112	Kärkivastus pohjaolosuhteissa, joissa kantavan kitkamaakerroksen yläpuolella on koheesiomaakerros	29
4.113	Kärkivastus pohjaolosuhteissa, joissa kantavan kitkamaakerroksen yläpuolella on löyhempi kitkamaakerros	30
4.114	Kärkivastus pohjaolosuhteissa, joissa kantavan kitkamaakerroksen alla on löyhempi kitkamaakerros	32
4.115	Kärkivastus koheesiomaakerroksessa	34
4.116	Kärkivastus kalliossa	34
4.117	Vaippavastus kitkamaakerroksessa	35
4.118	Vaippavastus koheesiomaakerroksessa	37
4.12	Kairausvastukseen perustuvat menetelmät	39
4.121	Paalun geotekninen kantavuus heijarikairausvastuksen perusteella	40
4.13	Dynaamiset paalutuskaavat	41
4.14	Dynaamiset koekuormitukset	42
4.2	Tulppautuneen paalun kantavuus	42
4.3	Negatiivinen vaippahankaus	44
4.4	Varmuustasovaatimukset	44
4.5	Paalun painuma	44
4.6	Sivukapasiteetti	47
4.61	Paalun sivukapasiteetti	47
4.62	Sivukuorma	47
4.63	Kuormitukset	48
4.64	Paalun murtomekanismit	49

4.65	Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot	52
4.66	Siirtymien laskeminen	53
4.67	Mitoitus staattiselle kuormitukselle	56
4.68	Mitoitus sykliselle kuormitukselle	57
4.69	Mitoitus dynaamiselle kuormitukselle	59
4.610	Juoksettuminen	62
4.611	Varmuuden huomioon ottaminen mitoituksessa	63
4.612	Sivukapasiteetin kasvattaminen	64
5.	PAALUN RAKENTEELLINEN KANTAVUUS	66
5.1	Paalun rakenteellisen kantavuuden suunnittelu	66
5.2	Rakenteiden mitoitus	66
5.21	Teräsputki paalu	66
5.211	Lyöntijännitykset	67
5.212	Käyttöjännitykset	67
5.213	Nurjahdus	68
5.22	Liittorakennepaalu	68
5.221	Lyöntijännitykset	68
5.222	Käyttöjännitykset	68
5.223	Nurjahdus	68
5.23	Teräskuorellinen betonipaalu	69
5.231	Lyöntijännitykset	69
5.232	Käyttöjännitykset	69
5.233	Nurjahdus	69
5.3	Korroosion huomioon ottaminen	69
5.31	Ylimitoitus	70
5.32	Erityisteräslejeeringit	70
5.33	Katodinen suojaus	70
5.34	Orgaaniset ja epäorgaaniset pinnoitteet	73
5.35	Betoniverhoilu	73
6.	PAALUT JA NIIDEN VARUSTEET	75
6.1	Putkien materiaali- ja laatuvaatimukset	75
6.11	Teräslajit	75
6.12	Laatuluokan valinta	75
6.13	Mitat ja tekniset toimitusehdot	75
6.2	Kalliokärki	76
6.3	Pohjalevy	77

6.4	Kärkivahvistus	77
6.5	Jatkos	78
6.51	Hitsaussuunnitelma	78
6.52	Railomuodot	79
6.53	Hitsauslisäaineen valinta	79
6.54	Putkien sovitus ja silloitus	79
6.55	Hitsaus	81
6.56	Hitsausliitosten laatuvaatimukset ja tarkastus	81
6.6	Yläpään kiinnitys betonirakenteisiin	82
7.	PAALUJEN SIJOITUS	83
7.1	Keskinäiset etäisyydet paaluryhmissä	83
7.2	Etäisyydet muista rakenteista	84
7.3	Poikkeamat	84
8.	TERÄSPUTKIPAALUTUKSEN POHJARAKENNUS- SUUNNITTELMA	85
9.	PAALUTUSTYÖ	87
9.1	Soveltuvat paalutuskalustot	87
9.2	Lyönnin keskittäminen	87
9.3	Lyöntienergian tarkistaminen	88
9.4	Lyöntiohjeen laadinta	88
10.	PAALUTUSTYÖN VALVONTA	90
10.1	Yhteenveto paalutustyönjohtajalle kuuluvista tehtävistä	90
10.2	Geoteknisen kantavuuden varmistaminen	91
10.3	Rakenteellisen kantavuuden varmistaminen	92
	KIRJALLISUUSLUETTELO	93

1. OHJEIDEN SOVELLUSALUE JA LIITTYMINEN MUIHIN OHJEISIIN

Tämä ohje on laadittu noudatettavaksi suunniteltaessa ja suoritettaessa paalutustöitä, joissa käytetään halkaisijaltaan yli 300 mm suuruisia teräspalkkipaaluja. Paalutus suoritetaan pudotusjärkäläellä tai muulla iskevällä laitteella varustettua paalutuskonetta käyttäen. Paalutuskoneen iskuenergian on oltava riittävä niin, että paalujen kantavuus on todettavissa paitsi tunkeutumissyvyyden myöskin käytetyn lyöntienergian tai iskuaaltojännityksen perusteella, jolloin paaluja voidaan pitää lyöntipaaluina. Näiltä osin tämä ohje on lähinnä lyöntipaalutusohjeen (LPO-87) sovellusohje. Erikoistapauksissa voidaan käyttää myös muunlaisia paalutuskoneita etenkin avoimien putkien upotuksessa. Mikäli upotuskaluston lyöntienergia ei ole kantavuuden kannalta riittävä tai sitä ei voida todeta, perustuu paalun kantavuuden toteaminen vain upotussyvyyteen. Tällöin paalut on yleensä pääosiltaan tyhjennettävä maasta ja täytettävä betonilla. Tällaisia paaluja käsitellään kitkapaaluina tai moreenikerrokseen tukeutuvina kaivinpaaluina, jolloin niiden geoteknisen kantavuuden mitoitukseen sovelletaan lähinnä suurpaaluohjeen (SPO-78) vastaavia kappaleita tai tämän ohjeen kappaleita 4.1 ja 4.2.

Paalujen valmistuksessa, pohjarakennussuunnittelussa ja paalutustöiden suorituksessa on noudatettava Suomen rakentamismääräyskokoelman määräyksiä, yleisiä työturvallisuutta koskevia säännöksiä ja näitä ohjeita sekä soveltuvien osin käytössä olevia normeja ja ohjeita, joista erityisesti mainittakoon

- Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry:n Pohjarakennusohjeet 1988 RIL 121
- Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry:n Lyöntipaalutusohje LPO-87 ja Suurpaaluohje SPO-78 sekä Kairausoppaat I, II, III, IV ja V ja pohjatutkimusmerkinnät
- Suomen Betoniyhdistys ry:n ja Teräsrakenneyhdistys ry:n Liittorakenteet suunnitteluohjeet 1988
- Tie- ja vesirakennushallituksen siltojen pohjatutkimusohje (TVH 733336), Sillanrakennuksen yleinen työselitys SYT (TVH 732230), Sillanrakennustöiden valvontaohje SVO (TVH 732232) ja Siltojen kuormat (TVH 722072)

2. POHJATUTKIMUKSET

2.1 Yleisvaatimukset

Rakennushankkeeseen ryhdyttäessä on suoritettava riittävän seikkaperäiset pohjatutkimukset suunnittelun eri vaiheita vastaavasti perustamistavan ja perustusrakenteiden sekä muiden pohjarakennustoimenpiteiden suunnittelua ja suoritusta varten.

Pohjatutkimukset suoritetaan Siltojen pohjatutkimusohjeen TVH 733336 mukaisesti.

2.2 Paalujen toimintatavan vaikutus

2.21 Tukipaalut

Tukipaaluperustuksia käytettäessä ulotetaan kairaukset kallionpintaan tai kiinteään pohjakerrokseen ja selvitetään sekä läpäistävien maakerrosten että pohjakerroksen pääpiirteittäinen rakenne. Kallionpinnan sijainti ja muodot selvitetään erityisesti silloin, kun koheesiomaakerrokset ulottuvat kallionpintaan tai kallionpinta on viettävä ja sen päällä oleva kitkamaakerros on löyhä taikka viettävän kallionpinnan päällä oleva kiinteärakenteinen kitka -tai moreenimaakerros on ohut.

- 2.211 o Paalujen tunkeutuvuuden ja kantavuuden selvittämiseksi on suoritettava heijarikairauksia. Tarvittaessa on tarkistettava myös kallionpinnan sijainti, jonka luotettava selvittäminen tapahtuu porakonekairauksin.
- 2.212 o Käytettäessä kallioon ulottuvia tukipaaluja selvitetään kallionpinta aina porakonekairauksin jokaisen paaluryhmän kohdalta. Eri-tyistapauksissa on tarpeen suorittaa myös kallion rakenteen selvityksiä kallionäyttekairauksin.

2.22 Kitkapaalut

Kitkapaaluja käytettäessä selvitetään maakerrosten väliset rajat ja maakerrosten ominaisuudet kuten rakeisuus ja rakenteellinen tiiviys sekä paaluilla läpäistävien kerrosten että varsinkin toimivaksi suunnitellun maakerroksen

osalta. Pohjatutkimukset suoritetaan pääasiassa heijarikairauksin tai puristin- ja heijarikairauksin. Maakerroksista, joihin paalut tukeutuvat on otettava maanäytteitä rakeisuuden määrittystä varten. Vaippavastuksen määrittämiseksi on suositeltavaa suorittaa kolmiaksiaalikohteita.

- 2.221 o Tutkimusmenetelmiä valittaessa ja tutkimusta suoritettaessa on kiinnitettävä huomiota erityisesti siihen, että myös kitkamaakerrosten välissä mahdollisesti esiintyvät koheesiomaakerrokset voidaan varmasti todeta ja paikallistaa.

Jos avoimena lyötävien kitkapaalujen kantavuutta suunnitellaan parannettavaksi maatulpan avulla, on tulppaavasta maakerroksesta otettava aina maanäytteitä, joista määritetään vähintään rakeisuus.

2.23 Sivukuormitetut paalut

Mikäli paalujen sivukapasiteettia on tarkoitus käyttää hyväksi ja/tai siitä tulee aiheutumaan paaluihin rasituksia, on hienorakeisten ja eloperäisten maakerrosten leikkauslujuus selvitettävä siipikairauksin.

2.24 Vetopaalut

Käytettäessä paaluja, joille tulee pysyvästi tai toistuvasti vetoa enemmän kuin paalu tehollisesti painaa, tulee pohjatutkimuksen avulla voida arvioida tai selvittää paalun vaipan ja maakerrosten välinen kitka- ja adheesiovoima.

- 2.241 o Pitkäaikaista vetovoimaa voidaan sallia vain karkearakeisilla tai moreenimaakerroksilla. Tätä varten tarvitaan kitkapaaluja vastaavat pohjatutkimukset. Hetkellistä vetovoimaa voidaan sallia koheesiomaakerroksissa. Tätä varten tarvitaan siipikairauksia, joiden perusteella vaipan adheesio määritetään.

2.25 Negatiivinen vaippahankaus

Siltä osalta paalun vaippaa, missä maakerrokset painuvat yli 5 mm enemmän kuin paalu esimerkiksi täytön vaikutuksesta, on voitava määrittää paalun vaipan ja maakerrosten välinen adheesiovoima.

- 2.251 o Pohjatutkimuksina tarvitaan siipikairauksia.

2.26 Teräspaalujen aiheuttamat erityisvaatimukset

Teräspaaluja käytettäessä on selvitettävä paalujen mahdollinen korroosiovaara. Jos maaperä todetaan syövyttämättömäksi puhtaaksi luonnon maapohjaksi merkittävää korroosiota tapahtuu vain hapellisissa olosuhteissa.

- 2.261 o Hapellisten olosuhteiden katsotaan voivan esiintyä Pohjarakennusohjeiden (RIL 121) esittämän alimman mitoittavan pohjavedenpinnan yläpuolella.

Jos maa tai vesi todetaan syövyttäväksi, kuten saattaa olla mm. liejun tai jätetäytteen sekä meri- tai jäteveden ollessa kysymyksessä, on teräspaalujen korroosioriski arvioitava yksityiskohtaisen korroosiotutkimuksen perusteella. Korroosioriskiä voidaan selvittää mm. vastusmittausten avulla (esim. korroosiosondi).

Rakennuskohteen lähistöllä sijaitsevien sähkölaitosten, radioasemien, sähköratojen yms. maadoitusten synnyttämät harhavirrat ja niiden aiheuttama korroosiovaara on arvosteltava erikseen.

3. TERÄSPUTKIPAALUJEN VALINTAPERUSTEET

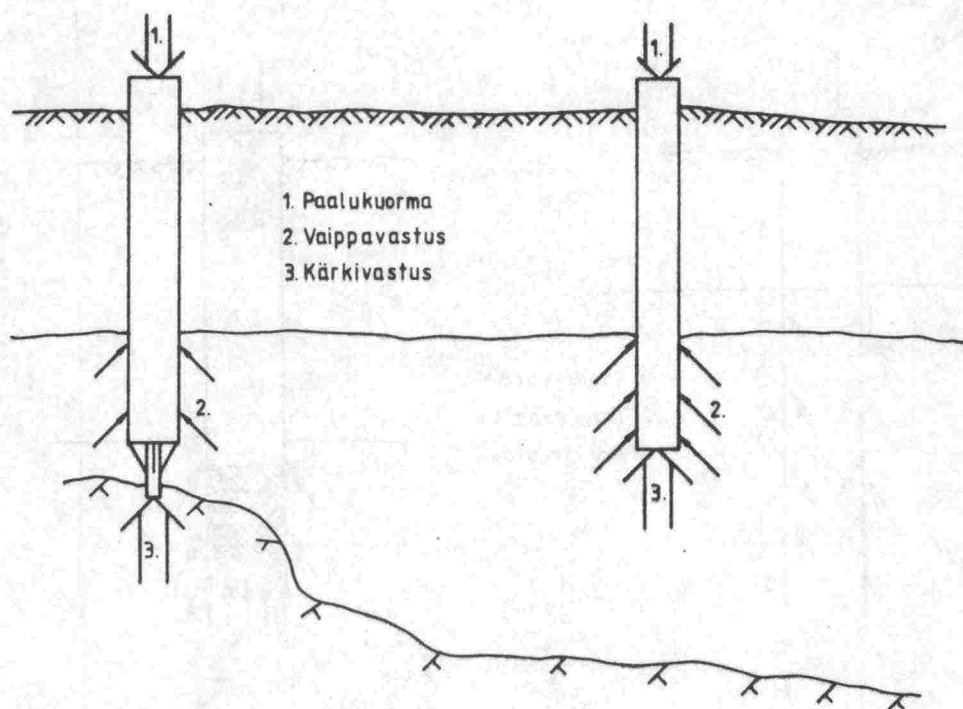
Suoritettaessa valintaa toimintatavaltaan erilaisten paalutyypin välillä vaikuttavat ratkaisuun ensisijaisesti rakennuspaikan pohjasuhteet ja rakenteiden asettamat vaatimukset.

3.1 Paalujen toimintatapa

3.11 Tukipaalu

Tukipaalu siirtää pääosan kuormastaan kärjen välityksellä kallioon tai tiiviiseen pohjakerrokseen. Osa kuormasta voi siirtyä ympäröivään maakerrokseen vaippakitkan avulla (kuva 1).

- 3.111 o Paaluperustuksessa on yleensä ensin selvittettävä tukipaalujen teknillinen ja taloudellinen käyttömahdollisuus. Käytettäessä suurta teräspalkkipaalia tukipaaluna, voidaan materiaalin lujuus käyttää kokonaan hyväksi.



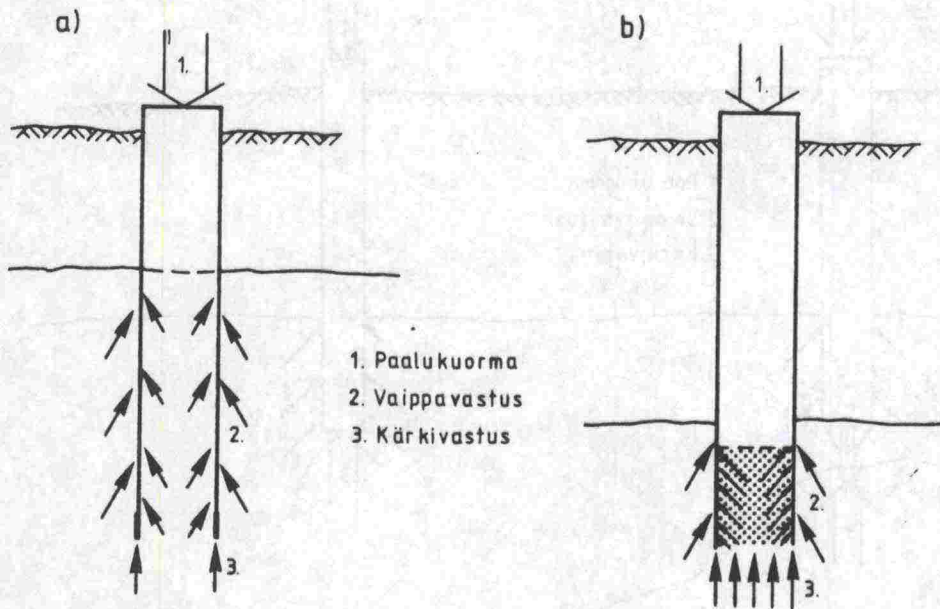
Kuva 1. a) Kallioon tukeutuvan tukipaalun toimintatapa.
b) Maahan tukeutuvan tukipaalun toimintatapa.

3.12 Kitkapaalu

Kitkapaalu siirtää pääosan kuormasta vaippavastuksen välityksellä viereiseen maakerrokseen. Kärjestä avoimen kitkapaalun toimintatapa voidaan rajata kahteen eri tapaukseen.

- a) Kitkapaalu siirtää pääosan kuormasta vaippakitkan välityksellä ympäröivään maakerrokseen. Osa kuormasta siirtyy kärjen välityksellä (kuva 2a).
- b) Kitkapaalu siirtää osan kuormasta ulkopinnan vaippakitkan välityksellä viereiseen maakerrokseen. Osa kuormasta siirtyy paalun alapäähän muodostuneen maatulpan välityksellä. Maatulppa muodostuu paalun sisään tunkeutuneen maan ja sisäpuolisen vaippapinnan välisen kitkan vaikutuksesta (kuva 2b).

3.121 o Kitkapaalun käyttö tulee kysymykseen silloin, kun kallion tai tiivisrakenteisen pohjakerroksen päällä oleva karkearakeinen maakerros tai moreenimaakerros on paksu.

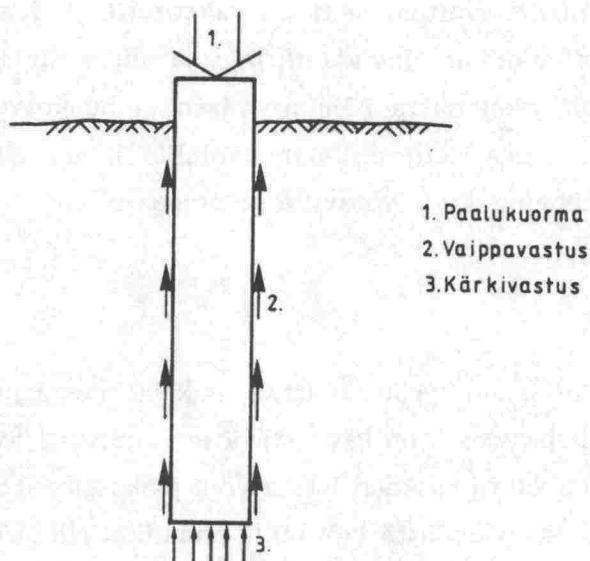


Kuva 2. Kitkapaalun toimintatapa. /2/

3.13 Koheesiopaalu

Koheesiopaalu siirtää kuorman viereiseen maakerrokseen vaippapinnalla syntyvän adheesion välityksellä. Kärkivastus on pieni (kuva 3). Koheesiopaaluilla perustettu rakenne tavallisesti painuu, koska paalut kuormittavat kokoonpuristuvia maakerroksia. Rakenteelle sallittavat painumat ja syntyvien painumien tasaisuus määräävät ratkaisun käyttökelpoisuuden.

- 3.131 o Koheesiopaalujen käyttö tulee pysyvissä rakenteissa kysymykseen ainoastaan silloin, kun koheesiomaakerros on erityisen paksu tai kova.



Kuva 3. Koheesiopaalun toimintatapa /2/.

3.2 Erilaisissa pohjasuhteissa ja ympäristöolosuhteissa soveltuvat paalutyypit

Suurten teräspalkkipaalujen edut verrattuina teräsbetonipaaluihin tulevat erityisesti esiin

- vaikeissa pohjaolosuhteissa
- vesirakentamisessa, erityisesti satamarakenteissa ja vesistösilloissa,
- paalujen saadessa taivutusrasituksia
- paalutettaessa lähellä helposti vaurioituvia rakenteita (avoimet paalut)

- o Vesirakentamisessa etuina ovat paalujen helppo käsittely yleensä ja erityisesti mahdollisuus uittaa niitä, kun päät suljetaan. Myöskin lyöntikaluston erityisesti dieseljunttien soveltuvuus lautalta työskentelyyn on tärkeä etu. Lisäksi paaluantura voidaan nostaa vesistön pohjasta lähelle vesirajaa, jolloin kasuunia käyttäen se voidaan valaa kuivatyönä.

Kun pehmeät maakerrokset ovat paksut tai vesisyvyys suuri on teräsputkipaalujen etuna hyvä kestävyys nurjahdusta vastaan. Kun on läpäistävä tiiviitä maakerroksia tai jostain syystä käytettävä pitkiä paaluja, on teräsputkipaalujen hyvä tunkeutuvuus merkittävä etu verrattuna teräsbetonipaaluuihin.

Jos lähellä on vaurioitumisherkkiä rakenteita, voidaan avoimia paaluja käyttämällä minimoida tärinät ja siirtymät sekä välttää maan lujuuden alenemista häiriintymisen ja huokosvedenpaineen nousun seurauksena. Suljetuillakin paaluilla maan syrjäytyminen on yleensä pienempi kuin lyötävillä betonipaaluilla.

3.21 Suljetut paalut

Suljetut paalut aiheuttavat maan syrjäytymistä, minkä johdosta helposti vaurioituvien rakenteiden läheisyydessä on käytettävä ensisijaisesti avoimia paaluja. Lisäksi syrjäytyminen vaatii raskaan lyöntityön, jonka aiheuttamat jännitykset kulkevat vaipan kautta yläpäästä lyötävillä paaluilla. Näitä ovat kallio-kärjellä ja pohjalevyllä varustetut paalut. Betonitulpalla varustetun alapäästä lyötävän paalun etuna edellisiin verrattuna on, että lyöntijännitykset eivät kulje vaipan kautta. Kuitenkin lyönti alapäähän vaatii alapään teräsosien huomattavaa vahvistusta ja iskunvaimennusta betonitulpalla.

3.211 Kallio-kärjellä varustetut paalut (kuva 4a)

Kallio-kärki estää kärjen liukumisen kalliopinnalla ja säilyttää paalun kärjen ehjänä lyötäessä sekä lisäksi kallio-kärki aikaansaa keskeisen kuorman ja samalla estää paalua rasittavan taivutusmomentin syntymisen.

- o Kallio-kärkeä käytetään kohteissa, joissa paalun kärki tukeutuu kallioon. Kärkimalleja on saatavissa erilaisia riippuen kallion lujuudesta ja sen kaltevuudesta paaluun nähden. Kallio-kärkeä käsitellään tarkemmin kohdassa 6.2.

Mikäli kalliopinta on jyrkästi viettävä, voidaan paalu kallioon tukeutumisen varmistamiseksi varustaa kalliokärjen läpi porattavalla terästäpilla.

3.212 Pohjalevyllä varustetut paalut (kuva 4b)

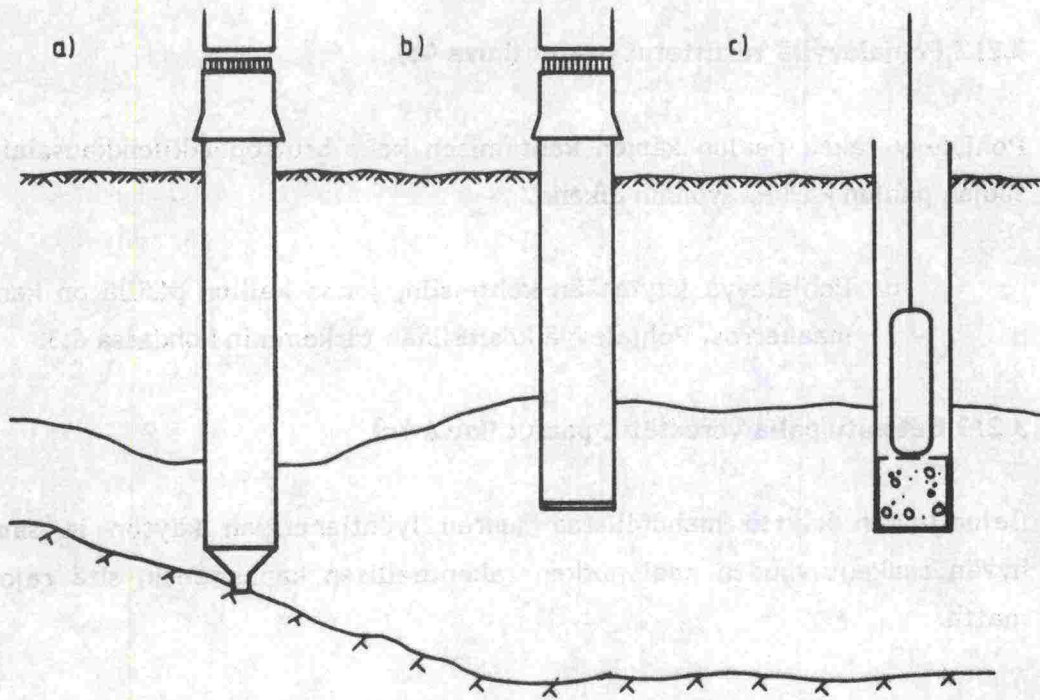
Pohjalevy takaa paalun kärjen kantamisen koko bruttopoikkileikkausalueelta ja suoja paalun kärkeä lyönnin aikana.

- o Pohjalevyä käytetään kohteisiin, joissa kallion päällä on kantava maakerros. Pohjalevyä käsitellään tarkemmin kohdassa 6.3.

3.213 Betonitulpalla varustetut paalut (kuva 4c)

Betonitulpan käyttö mahdollistaa suuren lyöntienergian käytön ja samalla hyvän tunkeutuvuuden paaluputken rakenteellisen kapasiteetin sitä rajoittamatta.

- o Betonitulpalla varustettu paalu soveltuu samoihin olosuhteisiin kuin pohjalevyllä varustettu paalu.



Kuva 4. a) kalliokärjellä varustettu yläpäältä lyötävä paalu
 b) pohjalevyllä varustettu yläpäältä lyötävä paalu
 c) betonitulpalla varustettu alapäältä lyötävä paalu.

3.22 Avoimet paalut

Avoimien paalujen syrjäyttämä maamassa on pieni ja maan häiriytyminen on vähäistä. Täten ne soveltuvat käytettäväksi helposti vaurioituvien rakenteiden lähellä. Lisäksi paalutustyö on helpompi ja vaipan kautta kulkevat jännitykset pienemmät verrattuna suljettuihin lyöntipaaluihin. Avoimia paaluja käytetään ensisijaisesti kitkapaaluina. Tällöin avoimen paalun käyttö edellyttää, että karkearakeinen maakerros tai moreenikerros kallion päällä on paksu eikä siinä esiinny huomattavaa kivisyyttä tai lohkaraisuutta.

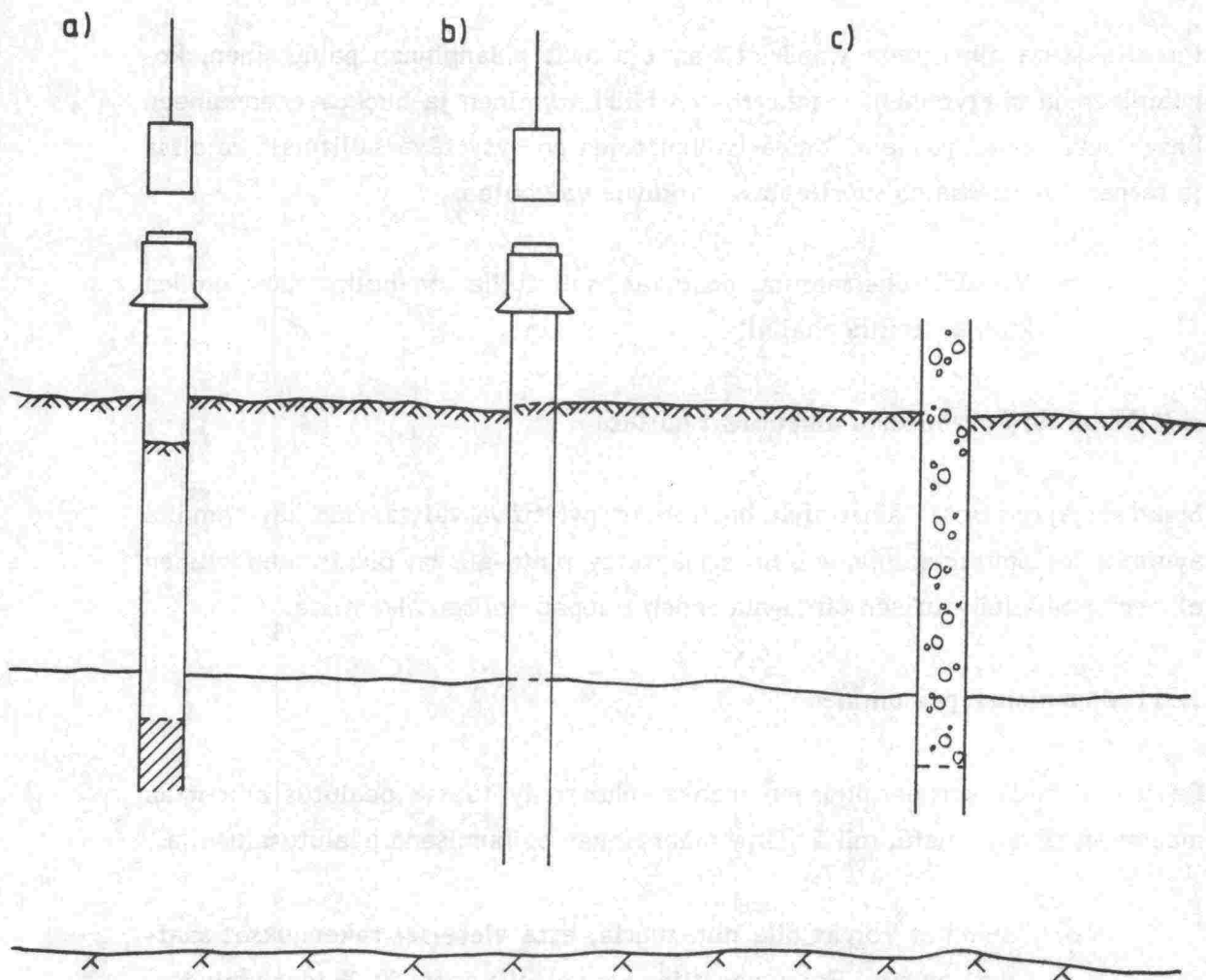
3.221 Tulppaava paalu (kuva 5a)

Tulppaava paalu soveltuu kohteisiin, joissa paalun sisään muodostuu kantavassa kerroksessa maatulppa kitkan vaikutuksesta. Tällöin paalu toimii lähes kuten suljettu paalu.

- o Avoin tulppaantunut paalu on edullinen teräspaalityyppi, jonka käyttö edellyttää kuitenkin tulpan muodostumisen toteamista. Tulppaantuminen tapahtuu halkaisijaltaan alle $\varnothing 700$ mm paaluilla, jos tulppaava maakerros on keskitiivis tai tiivis, riittävän suhteistunut ja silttipitoisuudeltaan vähäinen. Jos tulpan muodostumista ei voi todeta lyönnin yhteydessä, se on todettava kairauksilla. Mikäli tulpan muodostumiseen ei voida luottaa, on paalut mitoitettava tulppaantumattomina siten, että niiden kantavuus syvemmälle ulotettuina tulee vastaavaksi lisääntyneiden sisä- ja ulkopuolisten vaippavastusten ansiosta. Avointa paalua ei voida ulottaa kallioon.

3.222 Tulppaantumaton paalu (kuva 5b)

Tulppaantumaton kärjestä avointa paalua käytetään kohteissa, joissa tulpautumista ei tapahdu ja olosuhteiden vuoksi suljettua paalua ei voida käyttää.



Kuva 5. a) Avoin tulppaantunut paalu
b) Avoin tulppaantumaton paalu.
c) Teräskuorellinen betonipaalu

3.23 Teräskuorellinen betonipaalu (kuva 5c)

Teräskuorellista betonipaalua käytetään silloin, kun teräsputki upotetaan kallustolla, joiden lyöntienergia ei ole todettavissa. Teräskuorellinen betonipaalu on yleensä kaivettava tyhjäksi. Paalun alapäähän voidaan kuitenkin jättää ohuehko erittäin tiivis maakerros. Paalu betonoidaan yleensä vedenalaisena työnä. Teräskuorellinen betonipaalu voidaan kantavuudeltaan rinnastaa moreeniin tukeutuvaan tai kitkapaaluna toimivaan kaivinpaaluun kuitenkin niin, että vaippavastus on 70 % vastaavankokoisen kaivinpaalun vaippavastuksesta.

- o Teräskuorellista betonipaalua käytetään upotettaessa putket täryttämällä, painamalla tai hiertämällä. Edellä mainitun paalun käyttö mahdollistaa teräsputkien seinämän paksuuden pienentämisen ja teräslaadun alentamisen.

3.3 Paalutuksen ympäristövaikutukset

Paalutuksesta aiheutuvia ympäristöhaittoja ovat maanpinnan painuminen, kohoaminen ja siirtyminen, maakerrosten häiriintyminen ja huokosvedenpaineen kasvu sekä tärinä ja melu. Ympäristöhaittojen on pysyttävä sallituissa rajoissa ja tarpeen vaatiessa on suoritettava jatkuvaa valvontaa.

- o Ympäristöhaitat muodostuvat suljetuilla paaluilla suuremmiksi kuin avoimilla paaluilla.

3.31 Maan syrjäytymisestä aiheutuvat haitat

Maan syrjäytymisestä aiheutuvia haittoja on pyrittävä välttämään käyttämällä avoimia teräsputkipaaluja, jolloin syrjäytetty pinta-ala on pienin mahdollinen eli teräspoikkileikkauksen pinta-ala ennen tulppautumisen alkamista.

3.311 Maanpinnan painuminen

Paalua löyhään karkearakeiseen maakerrokseen lyödessä paalutus aiheuttaa maaperän tiivistymistä, mikä näkyy maanpinnan painumisena paalutusalueella.

- o Painumat voivat olla niin suuria, että viereiset rakennukset saattavat painua. Painuman tilavuus voi olla jopa 50 % maahanlyötyjen paalujen tilavuudesta. Painumia esiintyy 1/4 - 1-kertaa paalun

maassa olevan pituuden suuruisella etäisyydellä paalusta. Löyhässä kitkamaassa paalutus on edullisinta aloittaa riskialttiimmalta kohdalta pois päin edeten. Maanpinnan ja ympäröivien rakenteiden painumista valvotaan vaaituksilla.

3.312 Maakerrosten vaakasiirtymät ja maanpinnan kohoaminen

Lyötäessä paaluja hienorakeiseen maakerrokseen aiheuttaa paalutus saven syrjäytymistä, kun savi tai siltti ei tiivisty. Tämä ilmenee maanpinnan kohoamisena ja maakerrosten sivusiirtyminä.

- o Kohouman tilavuus voi vastata lyötyjen paalujen tilavuutta ja se esiintyy alueella, joka ulottuu savi- tai silttikerroksen syvyyden verran paalutuksen ulkopuolella. Paalujen lyönti on syytä aloittaa riskialttiimmasta kohdasta pois päin. Syrjäyttäminen voi aiheuttaa esimerkiksi viereisten putkien tai jopa rakennusten vaurioitumisen. Maanpinnan, paalujen ja ympäröivien rakenteiden kohoamista valvotaan vaaituksilla sekä paalujen ja ympäröivien rakenteiden siirtymiä siirtymämittauksilla.

3.313 Huokosvedenpaineen kasvu

Paalujen lyönti maakerrokseen aiheuttaa huokosvedenpaineen kasvua, mikä pienentää maapohjan leikkauslujuutta.

- o Rinnealueilla, maaluiskien ja kaivantojen lähellä paalutettaessa tulee paalutuksen aiheuttamia huokosvedenpaineita mitata ja ottaa ne huomioon vakavuuslaskelmissa. Huokosvedenpaineen lisääntymistä voidaan ehkäistä ensisijaisesti minimoimalla paalujen bruttopoikkileikkausala. Tämän jälkeen haittoja voidaan vähentää
 - poistamalla hienorakeisia maakerroksia paalun kohdalta esimerkiksi putken avulla,
 - varustamalla paalut liuskapystyöjillä,
 - jaksottamalla paalujen lyöntiä tai pidentämällä paalutuksen kesto.

3.314 Maakerrosten häiriintyminen

Paalujen lyönti hienorakeisiin maakerrokseen aiheuttaa niiden häiriintymisen takia lujuuden alenemista, joka palautuu hitaasti, mutta ylikonsolidoituneiden maakerrosten osalta vain osittain.

- o Rinnealueilla, maaluiskien ja kaivantojen lähellä paalutettaessa tulee paalutuksen aiheuttama leikkauslujuuden aleneminen ottaa huomioon vakavuuslaskelmissa. Sitä on syytä seurata siipikairauksin. Häiriintymistä voidaan ehkäistä ensisijaisesti minimoimalla bruttopoikkileikkausala. Lisäksi haittoja voidaan vähentää poistamalla hienorakeiset maakerrokset paalun kohdalta. Jaksottamalla paalujen lyöntiä tai pidentämällä paalutuksen kestoa voidaan antaa aikaa lujuuden palautumiselle.

3.32 Tärinävauriot

3.321 Paalutuksen aiheuttama tärinä

Tärinästä johtuvaa rakennusten vaurioitumisriskiä voidaan arvioida suurimman pystysuoran heilahdusnopeuden perusteella.

- o Paalutuksesta aiheutuvien tärinöiden taajuudet vaihtelevat 2 - 50 Hz. Suurimmat tärinät esiintyvät taajuusalueella 5 - 20 Hz.

Paalutustyöstä aiheutuvalle maanpinnan heilahdusnopeudelle on esitetty kaava, jota voidaan käyttää alustaviin tarkasteluihin

$$v_{\max} = 1,5 \frac{\sqrt{w}}{r} \quad (1)$$

v_{\max} = suurin pystysuora heilahdusnopeus, mm/s
 w = lyöntienergia, Joulea/lyönti (1 Joule = 1 Nm)
 r = etäisyys paalusta mittauspisteeseen, m

Maan laadun vaikutusta tärinän etenemiseen ei kaavassa ole otettu huomioon. Tärinä etenee pisimmälle pehmeässä savessa ja siltissä, jolla on korkea vesipitoisuus. Sorassa ja moreenissa tärinä vaimenee nopeimmin.

Paalutuspaikan lähellä sijaitsevaan rakennukseen siirtyvän värinän heilahdusnopeus on eräiden havaintojen mukaan noin 10 - 60 % kaavalla (1) saaduista arvoista rakennuksen perustamistavasta riippuen.

Rakennusten suurimpia sallittuja heilahdusnopeuden arvoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Rakennusten suurimpia sallittuja heilahdusnopeuden arvoja /3/.

Rakennuksen luokka	Rakennuksen laatu	Suurin heilahdusnopeus (mm/s)
1	Vanhat historialliset rakennukset.	2
2	Halkeilleet rakennukset, tiilirakennukset.	5
3	Hyväkuntoiset vauriottomat rakennukset.	10
4	Hyvin vahvat rakennukset.	10 - 40

Rakennuksen laadun lisäksi heilahdusnopeuden ja vaurioriskin vuorosuhde riippuu paikallisista olosuhteista, muun muassa pohjasuhteista sekä värinän laadusta, kestoajasta ja taajuudesta.

3.322 Värinätason valvonta ja alentaminen

Värinätasoa valvotaan värinämittauksin rakenteissa ja mahdollisesti laitteissa.

- o Yleensä riittää värinän heilahdusnopeuden mittaaminen, mutta vaativissa tapauksissa ja laitteiden osalta tulee mitata kiihtyvyyksiä ja taajuutta. Värinämittauspisteet asennetaan lähelle lyötävää paalua rakennuksen kantaviin rakenteisiin. Kipsisiltojen ja teippien asentaminen herkkiin paikkoihin on myös suositeltavaa.

Värinätasoa voidaan alentaa ensisijaisesti minimoimalla paalujen bruttopoikkileikkausala. Muita toimenpiteitä, joilla voidaan ehkäistä värinää ovat

- järkäleen iskujen pitäminen keskeisenä ja paalun pituusakselin suuntaisena,
- tarpeettoman lyönnin välttäminen. Paalun tavoitesyvyys ja loppulyöntiohje suunnitellaan tarkasti.

- alkureiän poraaminen paalulle täytteen, roudan tai tiiviin pintakerroksen läpi
- täryjuntan käytön välttäminen koheesiomaassa

3.33 Meluhaitat

3.331 Paalutuksesta aiheutuva melutaso

Paalutuksesta aiheutuvan melutason määrittämiseen soveltuvia laskumenetelmiä ei ole käytettävissä. Suurin sallittu melutaso L_{Aeq} saa olla enintään 80 dB tiloissa, joissa pääsääntöisesti oleskelee työmaalle kuulumattomia henkilöitä.

- o Taulukossa 2 on esitetty eräitä ohjearvoja, joita voidaan käyttää erityyppisten paalutuskoneiden aiheuttaman melutason arvioimiseen.

Taulukko 2. Erilaisten paalutuslaitteiden aiheuttama melu /3/.

Paalutuslaite	Melutaso 10 m:n etäisyydellä (dB)	Arvioitu etäisyys, jolla melutaso on 80 dB, (m)
Pudotusjärkele	91	36
Dieseljärkele	110	316
Paineilmajärkele	97	71
Täryjunta	93	45

3.332 Melutason pienentäminen ja valvonta

Melutasoa voidaan pienentää melulähteen eristämällä sekä sopivien iskutyynyjen käyttämisellä.

- o Paalutuskoneeseen on kehitetty asennettavia melusuojaimeja, joiden avulla melutaso on pienentynyt noin 20 dB. Lisäksi suojain estää öljyn roiskumisen ja pakokaasujen leviämisen.

Melutason valvonta suoritetaan äänitasomittauksin.

4. GEOTEKNINEN KANTAVUUS

Paalun kantavuus määritetään siten, että paalu lyöntirasitusten jälkeen riittäväällä varmuudella eri kuormitustapauksissa kestää sille tulevat kuormat painumien ja sivusiirtymien pysyessä rakenteen sietämissä rajoissa.

Paalun kantavuus määräytyy joko rakenteellisen tai geoteknisen kantavuuden perusteella, jolloin pienempi kantavuusarvo on määräävä.

Geotekninen kantavuus määritetään pohjasuhteiden ja paalutustyölle asetettavien vaatimusten sekä tarkastustoimenpiteiden mukaan.

- o Paalun geotekninen kantavuus koostuu paalun kärjen kantavuudesta eli kärkivastuksesta ja vaipan kantavuudesta eli vaippavastuksesta. Kärkivastuksen mobilisoituminen vaatii huomattavasti suuremman painuman kuin vaippavastuksen mobilisoituminen. Negatiivisen vaippahankauksen ja avoimen teräspalkkipaalun tulppautumisen vaikutus geotekniseen kantavuuteen tarkistetaan erikseen silloin, kun negatiivista vaippahankausta kehittyy tai paalu tulppautuu. Paalun mahdollinen korroosio ei vähennä geoteknistä kantavuutta.

4.1 Kantavuuden määrittystavat

Tässä ohjeessa käsitellään pääosin lyöntipaaluja, joiden geotekninen kantavuus on määritettävä sekä paalujen tunkeutumisvyyden että loppulyöntien perusteella. Erikoistapauksina käsitellään teräskuorellisia betonipaaluja, joiden teräspalkki on upotettu niin, ettei lyöntienergia lyöntipaalutuksen kannalta ole ollut riittävä. Näiden paalujen kantavuus määritetään tunkeutumisvyyden tai suurpaaluohjeiden (SPO-78) kaivinpaalutusta koskevien osien perusteella.

Paalun geotekninen kantavuus voidaan määrittää monella eri tavalla. Menetelmät voidaan karkeasti ryhmitellä epäsuoriin ja suoriin menetelmiin. Epäsuoria menetelmiä ovat:

- staattiset kantavuuskaavat
- empiiriset kairausvastukseen perustuvat menetelmät
- paalutuskatavat
- iskuaaltoteoreettiset laskelmat (ilman rakennuspaikalla tapahtuvaa iskuaaltomittausta)

Suoria menetelmiä ovat:

- iskuaaltoteoriaan perustuvat dynaamiset koekuormitukset
- staattiset koekuormitukset

Epäsuorilla menetelmillä suoritetaan suunnitteluvaiheessa sekä paalun koon ja tunkeutumissyvyyden mitoitus sekä lyöntikaluston mitoitus. Nämä tarkistetaan työmaalla suorilla menetelmillä, yleensä dynaamisilla koekuormituksilla.

Suljetun paalun kantavuus muodostuu kärkivastuksesta ja ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Avoimen paalun kantavuus muodostuu kärkivastuksesta, sisäpuolisesta vaippavastuksesta ja ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Avoimen tulppautuneen paalun kantavuus muodostuu tulppautuneen paalun kärkivastuksesta (kohta 4.2) ja ulkopuolisesta vaippavastuksesta.

Paaluryhmän kantavuutta määritettäessä tulee ottaa huomioon lähellä toisiaan sijaitsevien paalujen yhteisvaikutus.

o Paaluryhmän kantavuus on pienin seuraavista arvoista:

- yksittäisten paalujen kantavuuksien summa; (yleensä tukipaa-
luilla)
- kantavuus, joka saadaan otaksumalla paaluryhmä yhtenäiseksi
pilariperustukseksi tai
- kuormitus, joka aiheuttaa suurimman sallitun paaluryhmän
painuman.

4.11 Staattiset kantavuskaavat

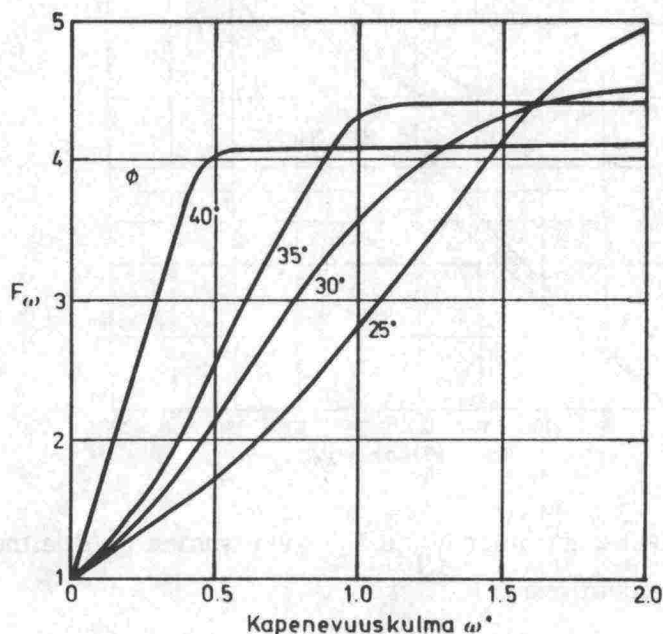
o Paalun geotekninen kantavuus määritetään yhtälöstä:

$$P_u = \int_0^L F_\omega \pi d f_s dz + A_{pk} q_p - w \quad (2)$$

P_u =	geotekninen kantavuus
L =	paalun pituus
F_ω =	kartiomaisuuden korjauskerroin
d =	paalun halkaisija
f_s =	vaippavastus
A_{pk} =	paalun kärjen poikkileikkauspinta-ala
q_p =	kärkivastus
w =	paalun paino
z =	paalun upotussyvyys kantavaan kerrokseen

Kartiomainen paalu on alaspäin kapeneva paalu. Paalun kartiomaisuus määritetään kapenevuuskulmalla (kapenevuus alaspäin), jonka yksikkönä on aste ($^{\circ}$).

Kartiomaisuuden korjauskerroin F_{ω} määritetään kitkamaalle kuvasta 6. Koheesiomaassa $F_{\omega} = 1$.



Kuva 6. Kartiomaisuuden korjauskerroin F_{ω} kapenevuuskulman ω^0 ja maan kitkakulman ϕ funktiona [9].

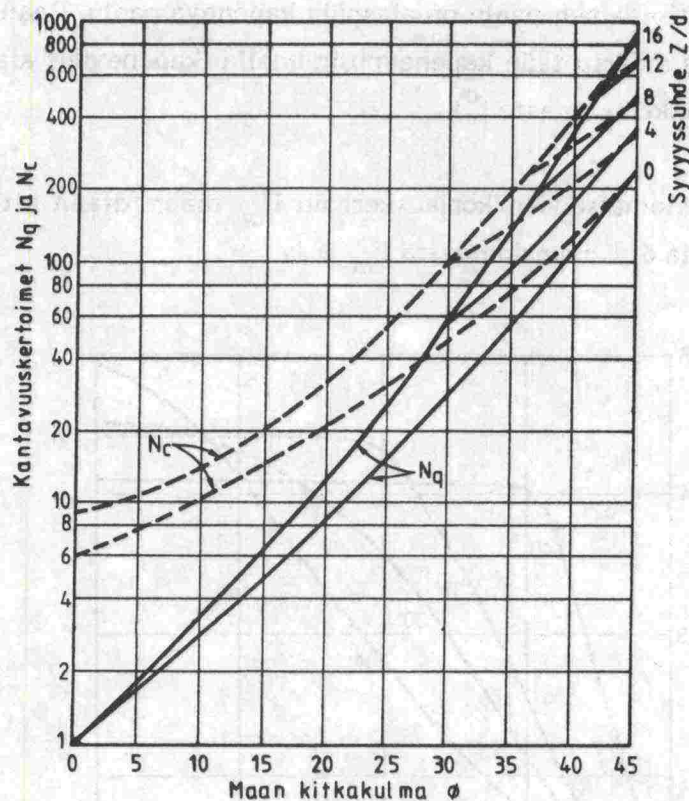
4.111 Kärkivastus homogeenisessä kitkamaakerroksessa

- o Kärkivastus q_p määritetään yhtälöstä

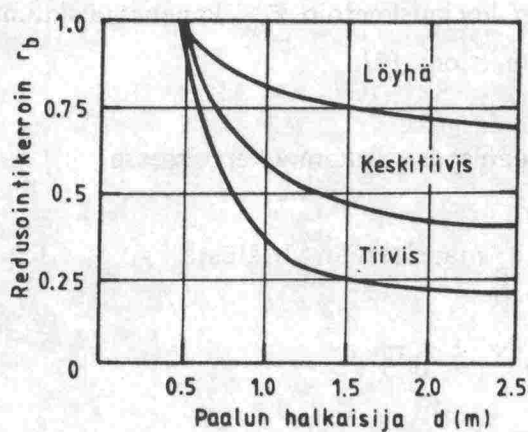
$$q_p = r_b \sigma'_{vp} N_q \leq r_b q_l \quad (3)$$

- σ'_{vp} = tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla
- q_l = kärkivastuksen maksimiarvo (kN/m^2) (kuva 9)
- r_b = paalun koosta aiheutuva redusointikerroin (kuva 8)
- N_q = kantavuuskerroin (kuva 7)

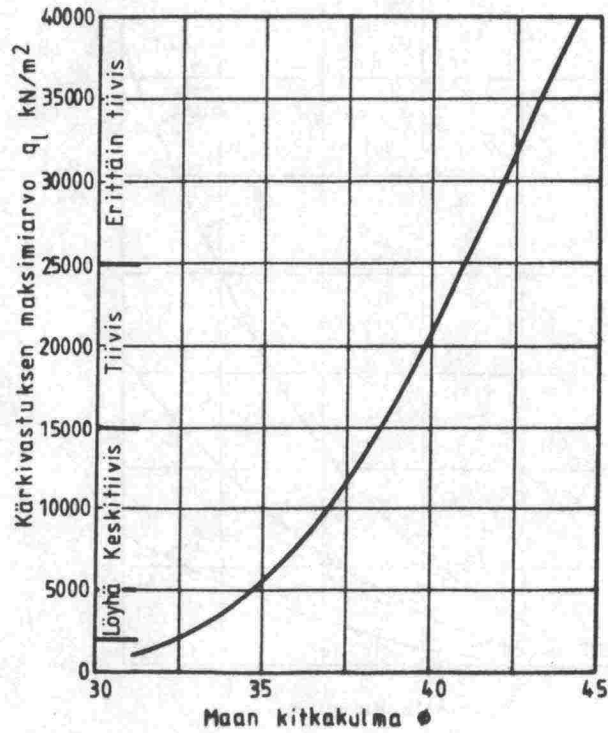
Kantavuuskertoimen määrittämisessä syvyysuhteessa z/d on z paalun upotussyvyys kantavaan kerrokseen ja d on paalun halkaisija.



Kuva 7. Kantavuuskertoimet N_q ja N_c syvyyssuhteen z/d ja maan kitkakulman ϕ funktiona /6/.



Kuva 8. Kärkivastuksen redusointikerroin maakerroksen tiiveyden ja paalun halkaisijan funktiona /7/.



Kuva 9. Kärkivastuksen maksimiarvo q_l hiekassa maan kitkakulman funktiona /6/.

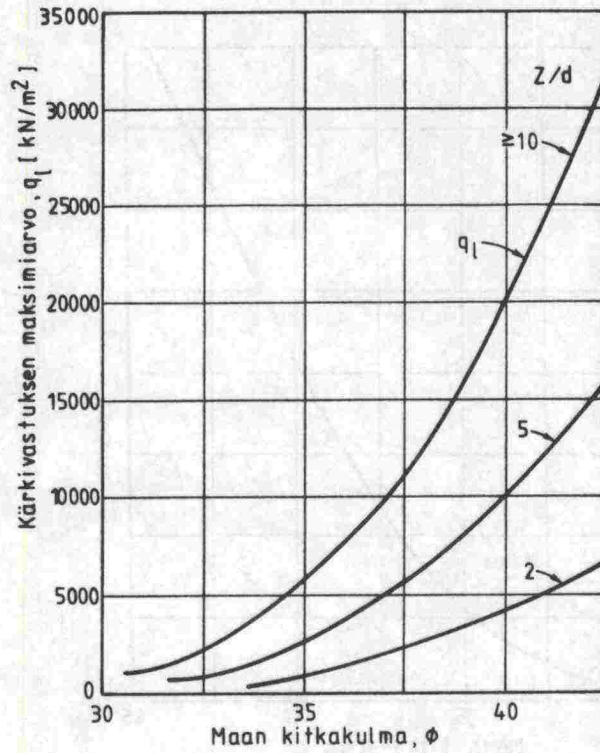
4.112 Kärkivastus pohjaolosuhteissa, joissa kantavan kitkamaakerroksen yläpuolella on koheesiomaakerros

- o Kärkivastus q_p määritetään kaavalla 3. Kantavuuskerroin N_q arvioidaan kuvasta 7 ja redusointikerroin r_b kuvasta 8.

Kärkivastuksen maksimiarvo q_l määritetään kuvasta 10. Määritelmässä upotussyvyyden oletetaan vaikuttavan syvyyteen 10 d asti. Kärkivastuksen maksimiarvo q_l voidaan myös laskea kaavasta

$$q_l = \frac{q_{l2} z}{10 d} \leq q_{l2} \quad (z/d \geq 10) \quad (4)$$

z = paalun upotussyvyys kantavaan kerrokseen
 q_{l2} saadaan kuvan 10 käyrästä $z/d \geq 10$.



Kuva 10. Kärkivastuksen maksimiarvo q_l syvyyssuhteen z/d ja maan kitkakulman ϕ funktiona [6/].

4.113 Kärkivastus pohjaolosuhteissa, joissa kantavan kitkamaakerroksen yläpuolella on löyhempi kitkamaakerros

- o Kuvassa 12 on esitetty tilanteesta laskentamalli.

Kärkivastus q_p määritetään kaavalla 3. Redusointikerroin r_b saadaan kuvasta 8.

Kriittinen syvyyssuhde z_{cl}/d kantavassa kerroksessa on 10 ja siihen ei vaikuta yläpuolisen kerroksen paksuus ja tiiveys. Kerrosrajan alapuolelle ulottuville paaluille saadaan kantavuuskerroin N_q kaavasta

$$N_q = N_{qi} + \frac{(N_{qm} - N_{qi}) z_l}{10 d} \leq N_{qm} \quad (5)$$

N_{qi} = kantavuuskerroin kerrosrajalla

N_{qm} = kantavuuskertoimen maksimiarvo

z_l = upotussyvyys kantavaan kerrokseen

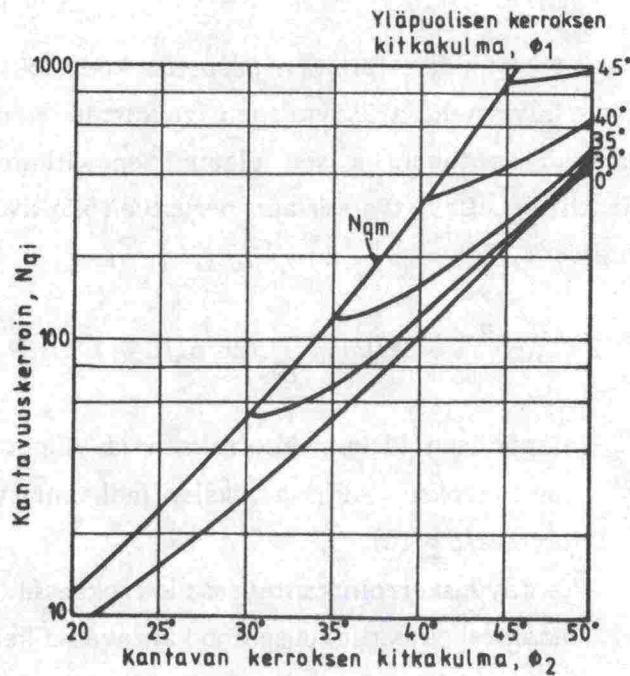
Kantavuuskerroin N_{qi} arvioidaan kokemusperäisistä käyristä yläpuolisen kitkamaakerroksen ja alapuolisen kantavan kerroksen kitkakulmien (ϕ_1 ja ϕ_2) funktiona (kuva 11). Samasta kuvasta saadaan myös kantavuuskertoimen maksimiarvo N_{qm} kantavan kerroksen kitkakulman ϕ_2 funktiona.

Kärkivastuksen maksimiarvo q_1 saadaan yhtälöstä

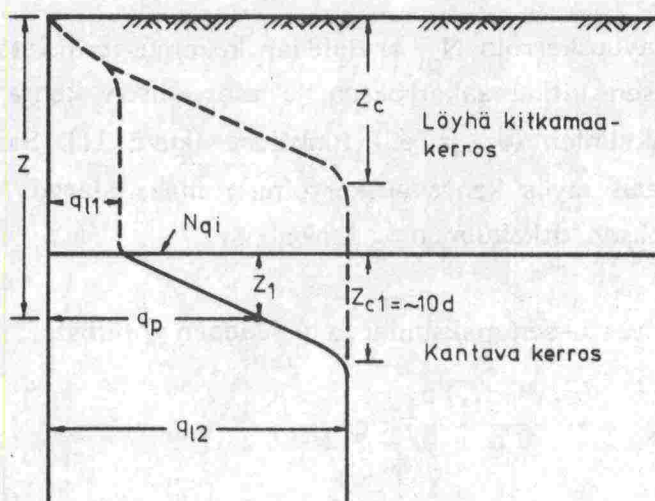
$$q_1 = q_{11} + \frac{(q_{12} - q_{11}) z_1}{10 d} \leq q_{12} \quad (6)$$

q_{11} ja q_{12} = yläpuolisen kitkamaakerroksen ja alapuolisen kantavan kerroksen kärkivastuksien maksimiarvot. Ne saadaan kuvasta 10 käyrästä $z/d \geq 10$.

z_1 = paalun upotussyvyys kantavaan kerrokseen



Kuva 11. Kerrosrajan kantavuuskerroin N_{qi} ja kantavuuskertoimen maksimiarvo N_{qm} maan sisäisten kitkakulmien funktiona /8/.



Kuva 12. Paalun kärkivastus löyhän kitkamaakerroksen alapuolisessa kantavassa kitkamaakerroksessa /6/.

4.114 Kärkivastus pohjaolosuhteissa, joissa kantavan kitkamaakerroksen alla on löyhempi kitkamaakerros

- o Kuvassa 14 on esitetty tilanteesta laskentamalli.

Kärkivastuksen q_p määrittäminen perustuu koetuloksiin ja lävistysteoriaan. Lävistyskäyttäytymiseen vaikuttaa suuresti paalun halkaisija sekä kantavan ja sen alapuolisen kitkamaakerroksen paksuus ja tiiveys. Lävistysteoriaan perustuen kärkivastus määritetään yhtälöstä

$$q_p = q_{l1} + 2 \gamma'_2 (H)^2 (1 + 2z/H) s K_{ps} \tan \phi_2 / d + \gamma'_2 H_1 N_q \leq q_{l2} \quad (7)$$

q_{l1} ja q_{l2} = alapuolisen kitkamaakerroksen ja yläpuolisen kantavan kerroksen kärkivastuksien maksimiarvot (kuva 10)
käyrä $z/d \geq 10$)

N_q = kantavuuskerroin kantavassa kerroksessa (kuva 11)

γ'_2 = maan tehokas tilavuuspaino kantavassa kerroksessa

H = kantavan kerroksen alapinnan ja paalun kärjen välinen etäisyys

H_1 = kantavan kerroksen vahvuus

z = upotussyvyys kantavaan kerrokseen

s = muotokerroin paalulle

K_{ps} = lävistyskerroin

ϕ_2 = maan kitkakulma kantavassa kerroksessa

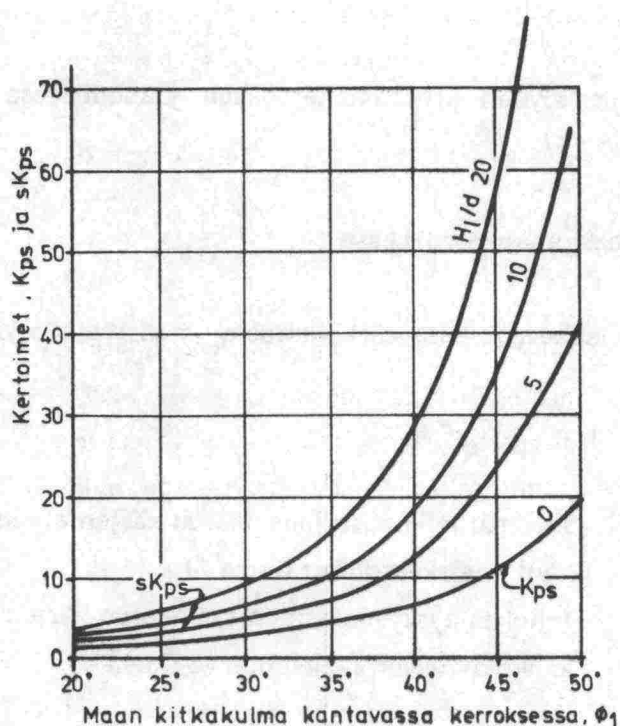
d = paalun halkaisija

Lävistyskerroin K_{ps} määritetään kantavan kerroksen paksuuden ja kitkakulman sekä paalun halkaisijan funktiona (kuva 13).

Muotokerroin s lasketaan Nagaokan (1973) kehittämästä kaavasta

$$s = 1 + 1,5 \sin \phi_2 \quad (8)$$

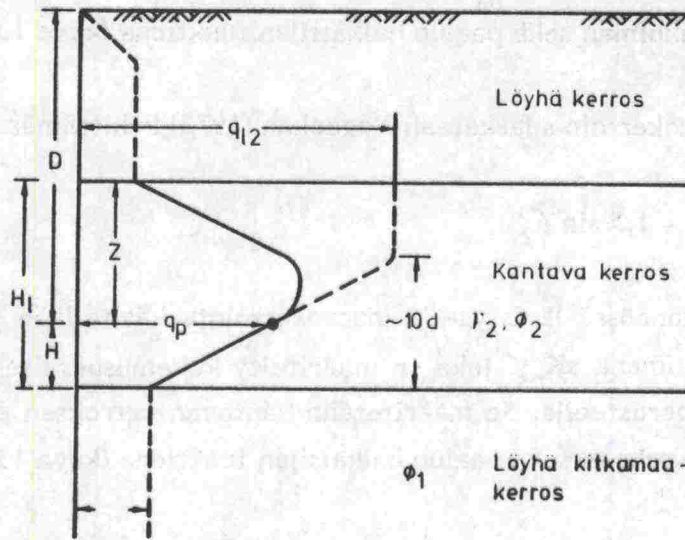
Käytännössä lävistys- ja muotokerrointa käsitellään yhdistettynä kertoimenä sK_{ps} , joka on määritelty kokemukseräisesti koetulosten perusteella. Se määritetään kantavan kerroksen paksuuden ja kitkakulman sekä paalun halkaisijan funktiona (kuva 13).



Kuva 13. Lävistyskerroin K_{ps} ja yhdistetyn lävistys- ja muotokerroin sK_{ps} määrittäminen kantavan kerroksen paksuuden ja kitkakulman sekä paalun halkaisijan funktiona [8].

Kärkivastuksen maksimi-arvo q_1 saadaan yhtälöstä

$$q_1 = q_{11} + \frac{(q_{12} - q_{11}) H}{10 d} \leq q_{12} \quad (9)$$



Kuva 14. Kärkivastus löyhän kitkamaakerroksen yläpuolisessa kantavassa kerroksessa /6/.

4.115 Kärkivastus koheesiomaakerroksessa

- o Koheesiomaakerroksessa kärkivastus q_p määritetään yhtälöstä

$$q_p = c_u N_c + \sigma'_{vp} N_q < q_l \quad (10)$$

- c_u = suljettu leikkauslujuus paalun kärjen alapuolella
- N_c, N_q = kantavuuskertoimet (kuva 7)
- σ'_{vp} = tehokas pystysuora jännitys paalun kärjen tasolla
- q_l = kärkivastuksen maksimiarvo (kuva 9)

Paalun kärjen halkaisijalla d on vaikutusta myös kantavuuskertoimen N_c suuruuteen. Mikäli $d \geq 1$ m, maksimiarvo $N_c = 6$.

4.116 Kärkivastus kalliossa

- o Kallioon tunkeutuneen paalun (vrt 3.211) kärkivastus q_p määritetään yhtälöstä

$$q_p = \frac{7q_{cyl}}{5\sqrt{d}} \text{ (MPa)} \quad (11)$$

q_{cyl} = kallion yksiakselialinen puristuslujuus (MN/m^2)
 d = kalliokärjen halkaisija (cm)

Lukuisten kuormituskertojen (5000 - 10 000) jälkeen kärkevustus

$$q_p \approx 2 q_{cyl} \quad (12)$$

Kalliomassan lujuutta voidaan arvioida kivilajien yksiakselialisten puristumurtolujuuksien perusteella (taulukko 3).

Taulukko 3. Kivilajien yksiakselialisia puristumurtolujuuksia. /4/

Kivilaji	Puristuslujuus MN/m^2	Kivilaji	Puristuslujuus MN/m^2
Graniitti	200 - 350	Amfiboliitti	180 - 420
Gneissi	140 - 300	Kalkkikivi	60 - 150
Kiilleliuske	130 - 210	Pegmatiitti	160 - 310
Kvartsiitti	200 - 300	Rapakivi	120 - 180
Leptiitti	270 - 420	Gabro	260 - 300

4.117 Vaippavastus kitkamaakerroksessa

- o Vaippavastus f_s määritetään yhtälöstä

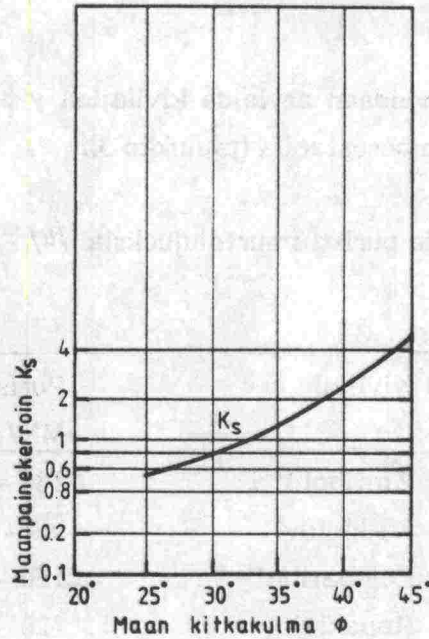
$$f_s = K_s \sigma'_v \tan \phi_a \leq f_l \quad (13)$$

K_s = maanpaine kerroin (kuva 15)
 f_l = vaippavastuksen maksimiarvo (kuva 16)
 ϕ_a = paalun ja maan välinen kitkakulma; $\tan \phi_a = 0,7 \tan \phi$
 σ'_v = tehokas pystysuora jännitys maassa

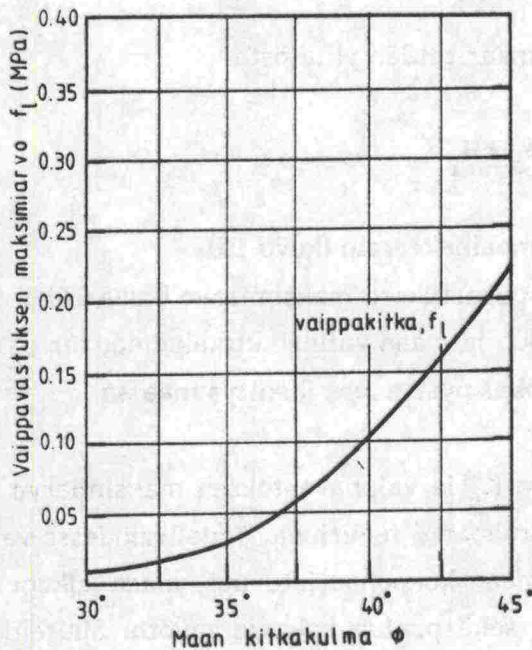
Maanpaine kerroin K_s ja vaippavastuksen maksimiarvo f_l määritetään maan kitkakulman ϕ funktiona. Todellisuudessa vaippavastukseen vaikuttaa maan kokoonpuristuvuus, maan alkuperäinen vaakasuora jännitys sekä paalun koko ja muoto. Suureiden K_s ja f_l tarkka määrittäminen edellyttää kuormituskokeita.

Paalun ja maan välinen kitkakulma ϕ_a on pienempi kuin maan kitkakulma ϕ . Redusointi suoritetaan termille $\tan \phi$. Kitkamaan ja teräksen välinen $\tan \phi_a$ saadaan redusoidulla $\tan \phi$ kertoimella 0,7.

Mikäli paalussa on kärkivahvistus on sen vaippavastusta pienentävä vaikutus otettava huomioon (kohta 6.4).



Kuva 15. Maanpainekerroin K_s maan kitkakulman ϕ funktiona [7].



Kuva 16. Vaippakitkan maksimiarvo f_l maan kitkakulman ϕ funktiona [7].

a) Kärjestä avoimen paalun sisäpuolinen vaippavastus

- o Jos paalussa ei tapahdu tulppautumista, voidaan sisäpuolisen vaippavastuksen olettaa olevan puolet ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Sisäpuolisesta vaippavastuksesta muodostuva kantavuus ei kuitenkaan saa ylittää vastaavan kokoisen tulppautuneen paalun kärkivastuksesta muodostuvaa kantavuutta. Jos paalu suunnitellaan kantamaan tulppautuneena, on suoritettava koepaalutus.

4.118 Vaippavastus koheesiomaakerroksessa

- o Vedellä kyllästetyssä savessa vaippavastus on sama kuin adheesio, kun paalutuksen jälkeinen huokosvedenpaine on olennaisesti vähentynyt. Vaippavastus määritetään -menetelmällä yhtälöstä

$$f_s = c_a = 0,8 r_d \alpha c_u \quad (14)$$

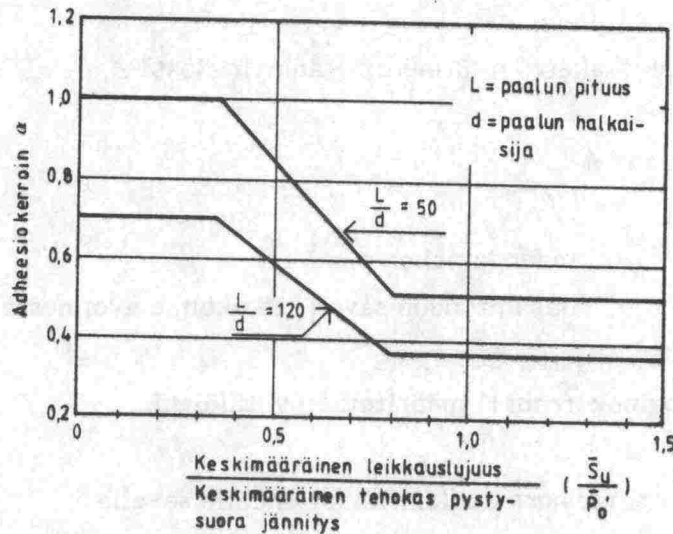
c_a = adheesio

α = adheesiokerroin (kuva 17)

r_d = adheesiokertoimen korjauskerroin pitkille paaluille (kuva 18)

c_u = suljettu leikkauslujuus

0,8 = teräksen ja betonin välinen reduktiokerroin



Kuva 17. Adheesiokerroin α betoni- ja puupaalulle savessa /20/.

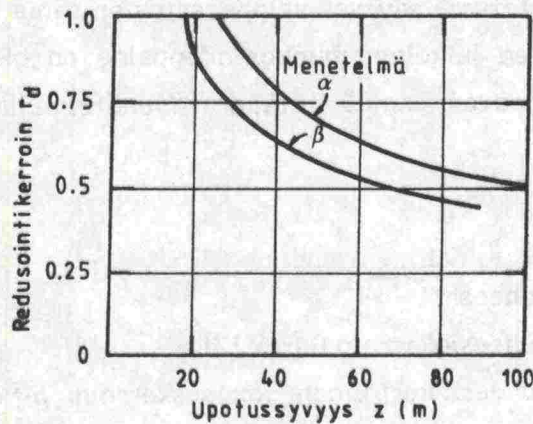
Huokosveden ylipaineen hävittyä vaippavastus määritetään häiriintyneen saven tehokkaan leikkauslujuuden perusteella β -menetelmällä yhtälöstä

$$f_s = 0,8 r_d \beta \sigma'_v \leq c_u \quad (15)$$

β = vaippakitkakerroin

σ'_v = tehokas pystysuora jännitys maassa

r_d = kertoimen β korjauskertoimen pitkille paaluille (kuva 18)



Kuva 18. Adheesiokertoimen α ja vaippakitkakerroimen β redusointikerroin r_d paalun upotussyvyyden z funktiona [7].

Vaippakitkakerroin β määritetään yhtälöstä

$$\beta = K \tan \phi' \quad (16)$$

K = maanpaine kerroin

ϕ' = häiriintyneen saven kitkakulma avoimesta kokeesta

Maanpaine kerroin K määritetään yhtälöistä

$$K = 1 - \sin \phi' \text{ normaalikonsolidoituneelle savelle} \quad (17)$$

$$K = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR} \text{ ylikonsolidoituneelle savelle} \quad (18)$$

OCR = ylikonsolidaatiosuhde

a) Kärjestä avoimen paalun sisäpuolinen vaippavastus

- o Sisäpuolisen vaippavastuksen voidaan olettaa olevan puolet ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Sisäpuolisesta vaippavastuksesta muodostuva kantavuus ei kuitenkaan saa ylittää vastaavan kokoi- sen tulppautuneen paalun kärkivastuksesta muodostuvaa kanta- vuutta. Jos paalu suunnitellaan kantamaan tulppautuneena, on suoritettava koepaalutus.

4.12 Kairausvastukseen perustuvat menetelmät

- o Paalun kantavuus voidaan arvioida suoraan kairausvastuksen pe- rusteella. Kokemusperäisiä menetelmiä on SPT-, heijari-, paino- ja puristinkairausvastuksille sekä pressometrituloksille. Eri kairaus- menetelmillä saatuja kairausvastuksia voidaan karkeasti vertailla keskenään (taulukko 4). Vertailu perustuu kitkakulman määrityk- seen.

Taulukko 4. Kitkakulmat kairausvastuksen perusteella Ruotsin ohje- ehdotuksen perusteella.

Suhteellinen tiiveys	Heijarikairaus N_{20} (L/0,2 m)	Puristinkairaus q_c (MPa)	Painokairaus N_{HT} (pk/0,2 m) 1)	SPT-kairaus N_{30} (L/0,3 m) 3)	Kitkakulma ($^\circ$) 2)	Kimmomoduuli E (MPa)
Hyvin löyhä	< 5	< 2,5	< 10	< 4	29 - 32	< 10
Löyhä	3 - 10	2,5 - 5,0	10 - 30	4 - 10	32 - 35	10 - 20
Keskitiivis	8 - 17	5,0 - 10,0	20 - 50	10 - 30	35 - 37	20 - 30
Tiivis	12 - 36	10,0 - 20,0	40 - 90	30 - 50	37 - 40	30 - 60
Hyvin tiivis	> 30	> 20,0	> 80	> 50	40 - 45	60 - 90

1) Ennen suhteellisen tiiveyden määrittystä siltissä tulee painokairausvastus jakaa 1,3:lla.

2) Annetut arvot pätevät hiekalle. Siltille käytetään 3^o pienempiä ja soralle 2^o suurempia arvoja

3) Taulukkoon on lisätty SPT-kairausvastuksen arvot.

Moreenin lujuus muodostuu yleensä sekä kitkasta että koheesiosta ja lujuus riippuu muun muassa raekoostumukses- ta, tiiviyydestä ja vesipitoisuudesta. Moreenin kitkakulmalle ei siten voida antaa yleispäteviä ohjearvoja. Mikäli moreeni sisältää enintään 30 % hienoaainesta, voidaan kuitenkin käyttää vastaavan karkearakaisen maala- jin kitka- kulman ominaisarvoa (esimerkiksi HkMr kuten Hk).

4.121 Paalun geotekninen kantavuus heijarikairausvastuksen perusteella

- o Paalun kantavuus P_u määritetään yhtälöstä

$$P_u = \int_0^L F_\omega \pi d f_s dz + A_{pk} q_p - w \quad (19)$$

$F_\omega =$ kartiomaisuuden korjauskerroin (kuva 6)

$L =$ paalun pituus

$d =$ paalun halkaisija

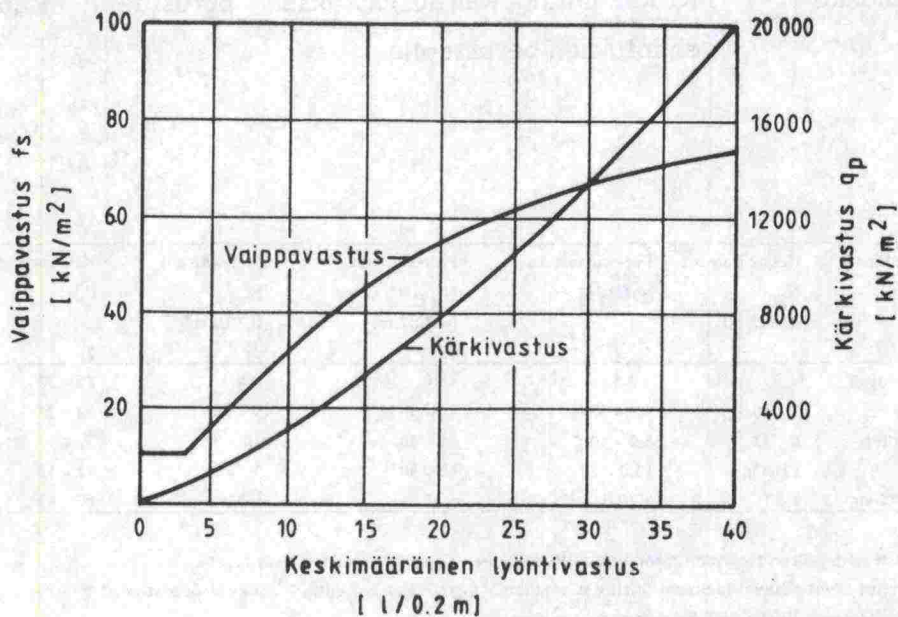
$f_s =$ vaippavastus (kuva 19)

$A_{pk} =$ paalun kärjen poikkileikkauspinta-ala

$q_p =$ kärkivastus (kuva 19)

$w =$ paalun paino

- o Vaippavastus ja kärkivastus määritetään teräspaalulle kuvasta 19. Materiaalin vaikutus vaippakitkakulmaan on otettu huomioon kuvan 19 vaippavastuskäyrässä.



Kuva 19. Vaippavastus f_s ja kärkivastus q_p teräspaalulle heijarikairauksen keskimääräisen lyöntivastuksen perusteella. Keskimääräinen heijarikairausvastus kärkivastuksen määrittämistä varten otetaan alkaen 5 d paalun kärjen yläpuolelta syvyyteen 3 d paalun kärjen alapuolelle /20/.

Kärjestä avoimen paalun sisäpuolinen vaippavastus

- o Jos paalussa ei tapahdu minkäänlaista tulppautumista, voidaan sisäpuolisen vaippavastuksen olettaa olevan puolet ulkopuolisesta vaippavastuksesta. Sisäpuolisesta vaippavastuksesta muodostuva kantavuus ei kuitenkaan saa ylittää vastaavan kokoisen tulppautuneen paalun kärkivastuksesta muodostuvaa kantavuutta. Jos paalu suunnitellaan kantamaan tulppautuneena, on suoritettava koepaalutus.

4.13 Dynaamiset paalutuskaavat

- o Dynaamiset paalutuskaavat perustuvat energiatarkasteluihin, joissa dynaaminen vastus muutetaan staattiseksi. Paalun kantavuus määritetään mitatun painuman avulla tanskalaisella kaavalla tai Gatesin kaavalla.

Tanskalainen kaava

$$P_u = \frac{e_f w_h H}{s + \sqrt{e_f w_h HL/2A_p E_p}} \quad (20)$$

Gatesin kaava

$$P_u = 96 \sqrt{e_f w_h H} (2,4 - \log s) \quad (21)$$

L	=	paalun pituus, m
A_p	=	teräsputken poikkileikkauspinta-ala, m ²
E_p	=	paalun kimmomoduuli, kN/m ²
e_f	=	lyönnin tehokkuuskerroin
e_f	=	1,0 vapaasti putoavalle pudotusjärkäleelle
e_f	=	0,85 vaijeritoimiselle pudotusjärkäleelle
w_h	=	järkäleen paino, kN
H	=	järkäleen pudotuskorkeus, m
s	=	mitattu paalun painuma/lyönti, m

Kun suunniteltaessa lyöntiä dieseljuntilla käytetään valmistajan ilmoittamia lyöntienergia-arvoja, on lyönnin tehokkuus tarkistettava työmailla dynaamisten koekuormitusten yhteydessä etenkin vanhoja diesel-junttia käytettäessä.

4.14 Dynaamiset koekuormitukset

- o Dynaaminen koekuormitus on suora paalun kantavuuden määrittämenetelmä, joka perustuu rakennuspaikalla suoritettaviin iskuaaltomittauksiin (PDA-mittauksiin). Mittaustuloksista lasketaan paalun staattinen kantavuus ottamalla huomioon dynaamisen kuormituksen nopeuden vaikutukset.

Dynaamisia mittauksia voidaan analysoida usealla eri tavalla, esimerkiksi CASE-menetelmällä. Saatuja tuloksia voidaan käsitellä edelleen tietokoneella. Sovittamalla maaparametrien avulla saadut jouset ja vaimentimet siten, että laskettu iskuaalto yhtyy mitattuun aaltoon, saadaan kuormitusjakauma paalussa selvitettyksi ja kuormat voidaan jakaa vaippa- ja kärkivastukseksi. Yleisimmin käytetty menetelmä on CAPWAP-analyysi.

4.2 Tulppautuneen paalun kantavuus

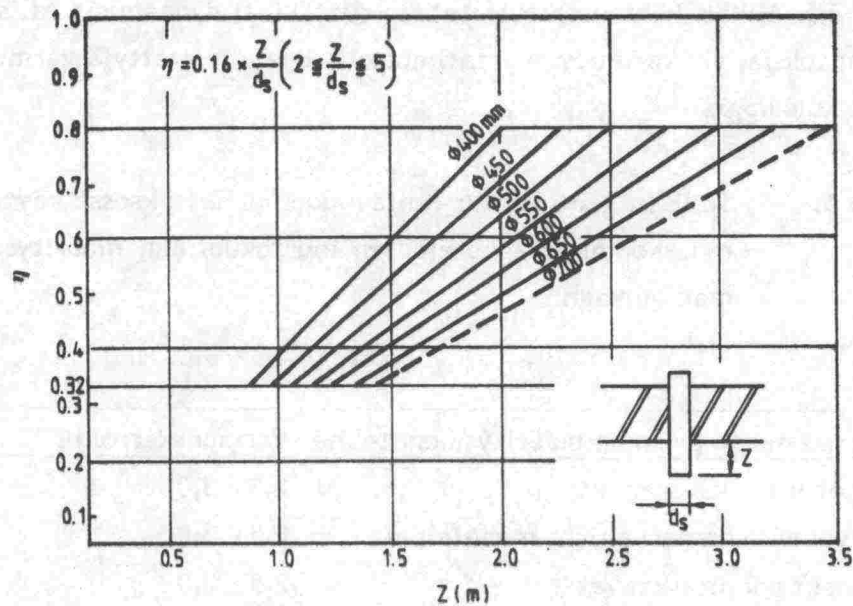
- o Kärjestä avoin paalu tulppautuu kitkamaakerroksessa, jos tulppaava maakerros sisältää vain vähän hienoainesta ja se on riittävän suhteistunut ja tiiveydeltään vähintään keskitiivis ja paalun sisähalkaisija d_s on enintään 700 mm. Lisäksi paalutustyö on suoritettava lyöväällä järkäleellä. Upotettaessa paalua täryjuntalla tulppautumista ei tapahdu. Jos paalu suunnitellaan kantamaan tulppautuneena, on suoritettava koepaalutus.

Kärjestä avoimen tulppautuneen paalun kantavuus määritetään yhtälöstä

$$P_u = \int_0^L \pi d f_s dz + \eta A_{pk} q_p - w \quad (22)$$

- d = paalun ulkohalkaisija
 f_s = vaippavastus ulkovaipalla
 η = tulppautumiskerroin
 A_{pk} = vastaavan kokoisen suljetun paalun kärjen poikkileikkauspinta-ala
 q_p = kärkivastus
 w = paalun paino

Tulppautumiskerroin η määritetään halkaisijaltaan 400 - 700 mm paaluille kuvasta 20.



Kuva 20. Tulppautumiskerroin η upotussyvyyden z ja paalun sisähalkaisijan d_s funktiona. z on upotussyvyys kitkamaakerrokseen, jonka kitkakulma $\phi \geq 40^\circ / 14^\circ$.

4.3 Negatiivinen vaippahankaus

- o Negatiivinen vaippahankaus määritetään LPO-87 mukaan.

4.4 Varmuustasovaatimukset

Varmuustasovaatimus riippuu paalun geoteknisen murtokuorman määrittämis-
menetelmän luotettavuudesta kyseessä olevissa olosuhteissa. Kokonaisvarmuus-
kertoimen arvoja on esitetty taulukossa 5.

Suurille teräspalkkipaaluille on yleensä tehtävä dynaamisia koekuormituksia.
Jos dynaamisia koekuormituksia ei tehdä, on paalun riittävä kantokyky voitava
todeta sekä kantavuuskaavojen että paalutuskaavojen avulla. Tällöin on staat-
tisilla kantavuuskaavoilla tai kairausvastukseen perustuvilla menetelmillä ja
paalutuskaavoilla saatava molemmilla varmuustaso $F \geq 2,2$. Jos geotekninen
kantavuus määritetään vain tunkeutumissyvyyden kuten esimerkiksi kaivinpaa-
luihin rinnastettavilla teräskuorellisilla betonipaaluilla on varmuustasovaati-
mus $F \geq 2,5$. Mikäli kohteessa suoritetaan riittävästi dynaamisia tai staattisia
koekuormituksia, voi varmuustasovaatimus olla edellä esitettyjä varmuustasoja
alempi (taulukko 5).

Taulukko 5. Sallitun geoteknisen kantavuuden määrittämisessä käytetyt var-
muuskertoimet geoteknisen murtokuorman määrittämismenetel-
män mukaan.

Geoteknisen murtokuorman määrittämismenetelmä	Varmuuskertoimen F
- staattiset kantavuuskaavat	2,5 - 3,0
- kairausvastukseen perustuvat menetelmät	2,5 - 3,0
- dynaamiset paalutuskaavat	2,5 - 3,0
- dynaaminen koekuormitus	2,0
- staattinen koekuormitus	1,8

4.5 Paalun painuma

- o Maakerrokseen päättyvien tukipaalujen painuman arvioiminen on epätarkkaa ilman koekuormituksia. Koekuormitukset pitää suorittaa siten, että paalun kärjen painuma voidaan havaita. Tukipaalu-
perustusten painumatarkastelu tapahtuu usein yksittäisten paalu-
jen painuma-arvioiden pohjalta.

Tukipaalun pään painuma S_o koostuu kimmolsesta kokoonpuristumasta S_e ja kärjen alapuolisten kerrosten muodonmuutoksesta S_s . Paalun yläpään painuma S_o on

$$S_o = S_e + S_s = \frac{QL}{A_p E_p} + \frac{Qd}{A_p E_s} \quad (23)$$

$Q =$ paalukuorma
 $L =$ paalun pituus
 $d =$ paalun halkaisija
 $A_p =$ paalun poikkileikkausala
 $E_p =$ paalun kimmomoduuli
 $E_s =$ paalun kärjen alapuolisen kerroksen muodonmuutosmoduuli

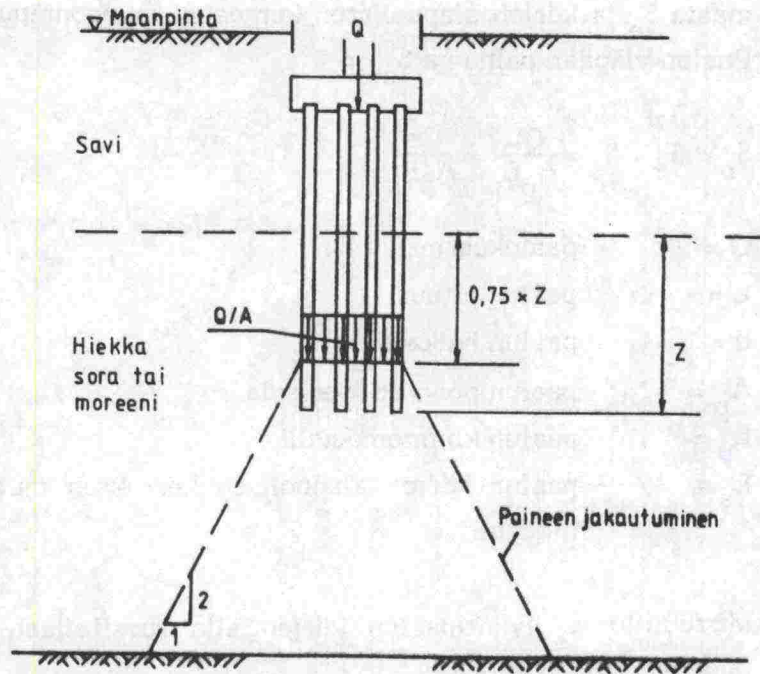
Moduulille E_s lyöntipaalun kärjen alla suositellaan taulukon 6 mukaisia arvoja.

Taulukko 6. Maan ja kallion kimmomoduulit E_s yksittäisen paalun kärjen alla lyöntityön jälkeen.

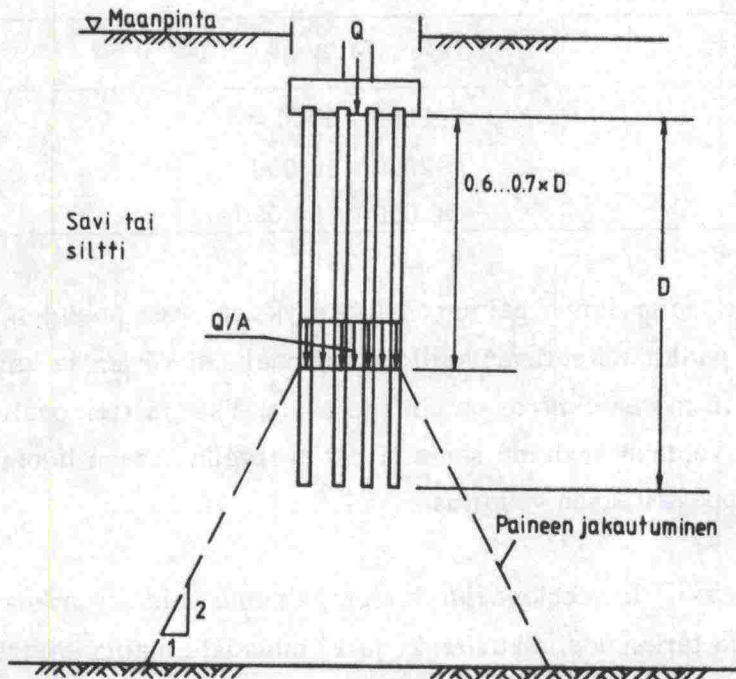
Maalaji	E_s MPa
Hiekka, sora	1000 - 2000
Moreeni	2000 - 10 000
Kallio	50 000 - 100 000

Tukipaaluryhmän painuma vastaa yksittäisten paalujen painumaa, jos paalut tukeutuvat kallioon tai paalujen kärjen ja kallion väliin jäävä moreenikerros on ohut ja tiivis. Yksittäisten paalujen painuma voidaan arvioida samalla periaatteella ottaen huomioon myös vaippavastuksen vaikutus.

Kitka- ja koheesiopaaluryhmien painuma voidaan laskea tyydyttävällä tarkkuudella kuvien 21 ja 22 mukaista mallia käyttäen.



Kuva 21. Kitkapaaluryhmän painuman laskeminen /12/.



Kuva 22. Koheesiopaaluryhmän painuman laskeminen /12/.

4.6 Sivukapasiteetti

4.61 Paalun sivukapasiteetti

Paalun sivukapasiteetilla tarkoitetaan yleensä paalun sietämää suurinta vaakakuormitusta, joka vastaa maan murtokuormaa tai joskus paalun myötömomenttia. Sivukapasiteetti muodostuu siten ympäröivän maan vastuksesta, yläpään kiinnitysasteesta ja paalun omasta taivutusjäykkyydestä. Ympäröivän maan käyttäytyminen saattaa muodostua määrääväksi erityisesti, jos kuormitus on toistuvaa tai dynaamista.

Sivukapasiteetin määrää sillan suunnittelussa kuitenkin yleensä sallittu vaakasiirtymä, koska muodonmuutokset saattavat kasvaa siltarakenteiden kannalta liian suuriksi paljon ennen sivukapasiteetin ylittymistä. Sallitut vaakasiirtymät määräytyvät tällöin muun rakenteen sallimista siirtymistä.

- o Paaluryhmän sivukapasiteetti on yleensä pienempi kuin paalujen lukumäärä kertaa yksittäisen paalun sivukapasiteetti, jos paalujen keskiöväli vaakavoiman suunnassa on pienempi kuin 6 - 8 kertaa paalun halkaisija. Sivuvastus- ja kapasiteetti pienenevät edelleen peräkkäisten paalurivien lisääntyessä voiman vaikutussuunnassa ja paalujen keskiöetäisyyksien pienentyessä.

Paaluryhmän mitoitus palautuu periaatteessa yksittäisten paalujen mitoitukseksi, kun paaluanturan kautta paaluille tulevat kuormat on määritetty jollakin yleisesti hyväksytyllä menetelmällä.

4.62 Sivukuorma

Paalun sivukuormitus syntyy tunnetun siirtymän aiheuttamasta pakkovoimasta tai maanpaineesta paalua vasten.

- o Pakkovoimat aiheutuvat lähinnä ylärakenteen lämpötilan muutok-
sista.

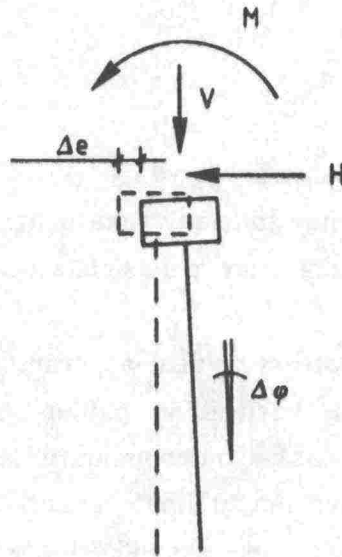
Maanpaine aiheutuu maanpintojen korkeuseron, kaivannon tai kaltevan luiskan heikon vakavuuden aiheuttamasta maamassan siirtymisestä paalua vasten. Kun varmuus maamassan liukusortumalle paalujen alueella on $F < 1.8$ maassa syntyy plastisia liikkeitä ja

maanpaine paaluja vastaan on otettava huomioon. Tätä suuremmalla varmuustasolla syntyy kuormituseroista vain kimmoisia siirtymiä, jotka voivat pehmeissä maakerroksissa olla niin suuria, että niiden huomioonottaminen paalua kuormittavassa taivutuksessa on tarpeen. Sivukuormitusta paaluille syntyy myös maanpinnassa vinopaalujen ympärillä sekä routimispaineesta, jonka syntyminen on yleensä estettävä.

Sivukuorman suuruus riippuu maan leikkauslujuudesta, paalun muodosta ja kuormitusnopeudesta. Sivukuorma on suurimmillaan silloin, kun paalu leikkautuu maamassan läpi. Tällöin sivukuorman ääriarvo saadaan kappaleen 4.65 mukaan. Mitoitettaessa paalua pakkovoimasta tai maanpaineesta aiheutuvalle sivukuormalle voidaan käyttää moduuli- tai alustalukumenetelmän mukaisia sivupainesiirtymä-yhteyksiä (vrt. kappale 4.66)

4.63 Kuormitukset

Paalun mitoituksessa vaakasuuntaiset kuormat ja momentit on paalunsuuntaisten kuormien lisäksi otettava huomioon. Mitoitus on suoritettava vaarallisimmille kuormitusyhdistelmille. Kuormitukset on määritettävä TVH:n ohjeen Siltojen kuormat (TVH 7220 72) ja muiden voimassaolevien ohjeiden mukaisesti. Paalujen kuormituksessa on myös otettava huomioon myös paalurakenteen sijainti- ja kaltevuusvirheiden sekä ylärakenteen sijaintivirheiden ja siirtymän aiheuttamat lisärasitukset (kuva 23).



$$M_{\text{tod}} = M + V \cdot \Delta e$$

$$H_{\text{tod}} = H + V \cdot \sin \Delta \varphi$$

$$V_{\text{tod}} = V$$

Kuva 23. Paalun lisäkuormituksia aiheuttavat sijaintipoikkeamat.

- o Paalujen toleranssit on määritettävä suurpaaluohjeista (SPO-87) poikkeavasti, jos ohjeen mukaisesti sijaintipoikkeamat voivat aiheuttaa yli 15 %:n ylityksen sallittuun kantavuuteen. Näin menetellen vain sallitut sijaintipoikkeamat ylittävien paalujen kuormitukset on tarkistettava paalutustyön jälkeen. Tarvittaessa sijaintipoikkeamiin voidaan varautua käyttämällä mitoituksessa sallittua kantavuutta pienempää paalukuormaa.

4.64 Paalun murtomekanismit

Sivukuormitetun paalun murtomekanismit riippuvat maan ja paalun suhteellisesta jäykkyydestä sekä paalun kiinnityksestä rakenteessa.

- o Suhteellista jäykkyyttä voidaan arvioida parametrillä R koheesio-
maassa ja parametrillä T kitkamaassa.

$$R = \sqrt[4]{E_p \cdot I_p / E_s} \quad (24)$$

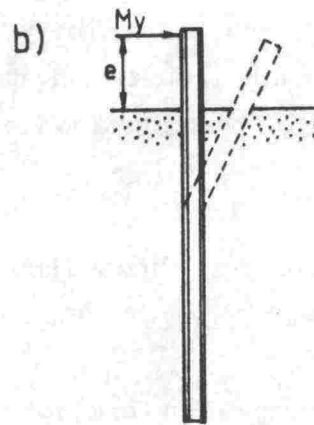
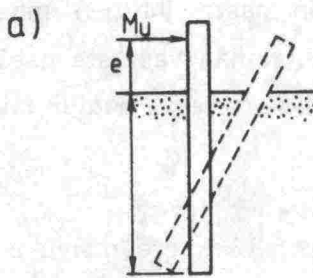
$$T = \sqrt[5]{E_p \cdot I_p / n_h} \quad (25)$$

$E_p I_p$ = paalun jäykkyys
 E_s = koheesiomaan vaakasuuntainen moduuli
 n_h = kitkamaan vaakasuuntainen alustalukukerroin

Kun paalun upotussyvyyden ja parametrin suhde L/R tai L/T on enintään kaksi, käsitellään paalua jäykästi maassa kiertyvänä kappaleena ja paalun muodonmuutokset voidaan jättää huomioon ottamatta. Maan murtuminen tapahtuu tällöin ennen paalun murtumista. Kiertokeskuksen paikka lasketaan siten, että vaikuttavat momentit ovat tasapainossa. Kiertokeskuksen sijainniksi voidaan homogeenisessä maaperässä olettaa likimäärin 30 % upotussyvyydestä paalun kärjestä lukien. Tällöin voidaan myös käsinlaskentana arvioida sivukapasiteettia määrittämällä ensin sivuvastuksen ääriarvo ja jakautuma. Periaatetta on selvitetty lähteen /1/ kohdassa 3.5.

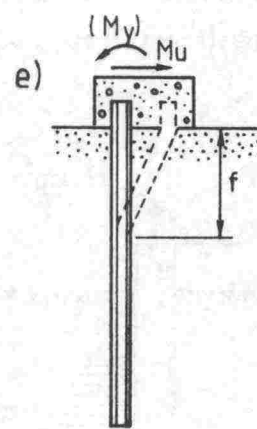
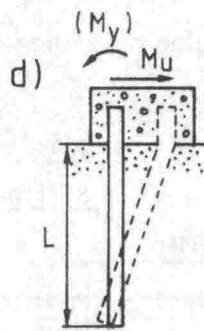
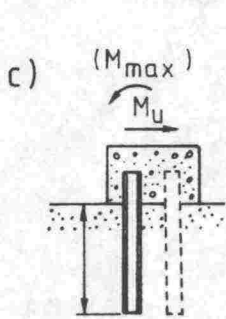
Kun parametrien L/R tai L/T suhde on vähintään neljä, on laskelmissa otettava huomioon myös paalun muodonmuutokset. Paalun murtuminen tapahtuu tällä jäykkyysasteella ennen maan murtumista. Parametrisuhteen ollessa välillä 2 - 4 voidaan väliarvot interpoloida riittävällä tarkkuudella. Parametrisuhteen arvoa neljä vastaavaa pituutta voidaan pitää paalun toiminnallisen pituuden ääriarvona, jonka jälkeen upotussyvyyden lisääminen ei vaikuta paalun toimintaan.

Kuvassa 24 on esitetty jäykkyysuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin. Kuvat 24 a ja c edustavat jäykkyysuhteen arvoja ≤ 2 , kuva 24 d arvoja 2 - 4 ja kuvat 24 b ja c arvoja ≥ 4 .



Vapaa pää

- a) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \leq 2$
- b) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \geq 4$



Kiinnitetty pää

- c) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \leq 2$
- d) jäykkyysuhde L/R tai $L/T 2 - 4$
- e) jäykkyysuhde L/R tai $L/T \geq 4$

Kuva 24. Jäykkyysuhteen vaikutus paalun murtomekanismiin.

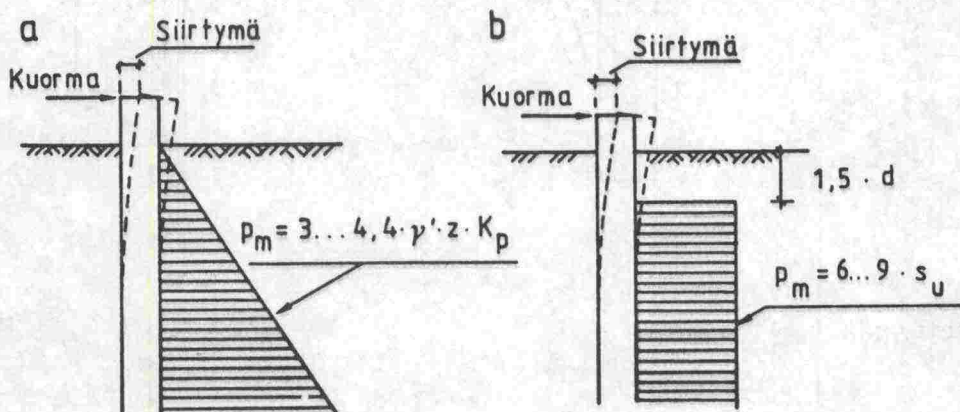
4.65 Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot

Sivuvastus syntyy, kun paalu siirtyä ulkoisesta kuormasta johtuen maata vasten. Sivuvastuksella tarkoitetaan maamassan aiheuttamaa vastusta paalun pintayksikköä kohti. Sivuvastusta käytetään hyväksi laskettaessa paalun sivukapasiteettia.

Sivupaine syntyy, kun maa siirtyä paalua vasten. Käsitettä käytetään sivukuormitusta laskettaessa.

Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot riippuvat maan lujuusominaisuuksista ja kitkamaalla myös tehokkaasta tilavuuspainosta.

Sivuvastuksen ja sivupaineen ääriarvot määritetään maan murtotilan mukaan maanpaineteoriaan perustuen. Varmuus sijoitetaan sivuvastuksen ja sivupaineen laskentaan kappaleen 4.611 mukaan siten, että epäedullisin vaikutus sivukapasiteettiin tai sivukuormitukseen tulee huomioon otetuksi.



Kuva 25. Sivuvastuksen ja sivupaineen p_m [kN/m²] ääriarvot a) kitkamaassa ja b) koheesiomaassa.

- o Kuvassa 25 esitetty kitkamaan sivuvastuksen arvo $p_m = 4,4 \cdot \gamma' \cdot z \cdot K_p$ /1/ saadaan käytettäessä todellista kiertokeskusta lyhyellä paalulla. Tätä vastaa Bromsin esittämä sivuvastuksen ääriarvo $p_m = 3 \cdot \gamma' \cdot z \cdot K_p$ käytettäessä Bromsin murtomekanis-mia lyhyellä paalulla.

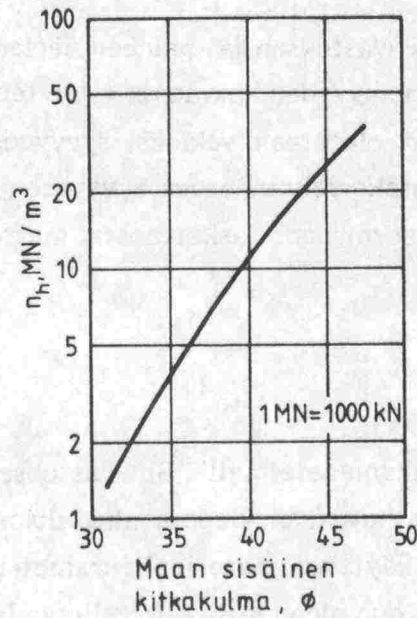
Kitkamaassa sivuvastuksen ja -paineen ääriarvon oletetaan kasvavan lineaarisesti syvyyden kasvaessa syvyyteen $10 \cdot d$ asti. Koheesiomaassa arvot oletetaan vakioksi syvyydestä riippumatta. Koheesiomaan pintakerroksen osuus syvyyteen $1,5 \cdot d$ asti otetaan huomioon sivukuormitusta laskettaessa, mutta ei sivukapasiteettia laskettaessa.

4.66 Siirtymien laskeminen

Siirtymät lasketaan alustalukumenetelmällä. Sivuvastuksen/sivupaineen ja siirtymän välistä vuorosuhdetta kuvataan yleensä alustalukujen avulla. Siirtymät lasketaan käyttörajatilassa käyttäen materiaaliparametrien ja kuormien ominaisarvoja. Varmuus otetaan huomioon sallittujen siirtymien arvoissa.

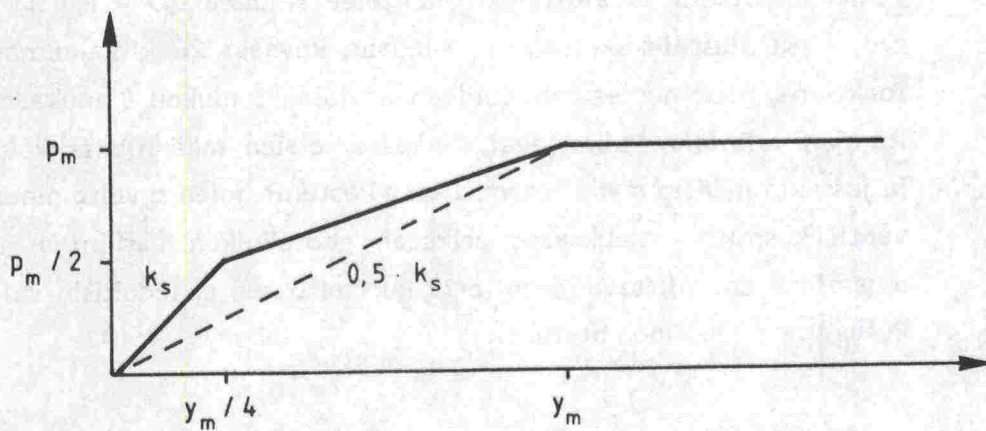
- o Alustalukumenetelmän mukaiset vaakasuorat alustaluvut voidaan valita kuvien 27 ja 28 mukaan.

Kitkamaan vaakasuoran alustaluvun k_s oletetaan kasvavan lineaarisesti rajasyvyyteen $z = 10 d$ asti ja pysyvän tämän jälkeen vakiona. Kitkamaan alustaluku vaihtelee rajoissa $0,5 - 1,0 n_h \cdot z/d$, jossa alustalukukerroin n_h saadaan kuvasta 26 kitkakulman funktiona, jota puolestaan voidaan arvioida taulukon 4 mukaan. Rajojen valintaan vaikuttavat maaparametrien määritystarkkuus ja jossakin määrin myös kuormituksen kesto. Rajojen soveltaminen vaatii kussakin tapauksessa erikseen geoteknikon harkintaa ja alustaluku on valittava siten, että kuormituksen epäedullisin vaikutus tulee huomioon otetuksi.



Kuva 26. Kitkamaan alustelukukertoimen arviointi kitkakulman perusteella. Pohjavedenpinnan alapuolella $n_h = 60\%$ kuvan arvoista /3/.

- o Kuvassa 27 on esitetty tapa, jolla voidaan kuvata tarkemmin alustaluvun todellista sivupaine-siirtymä-yhteyttä.



Kuva 27. Kitkamaan alustaluvun määrittäminen.

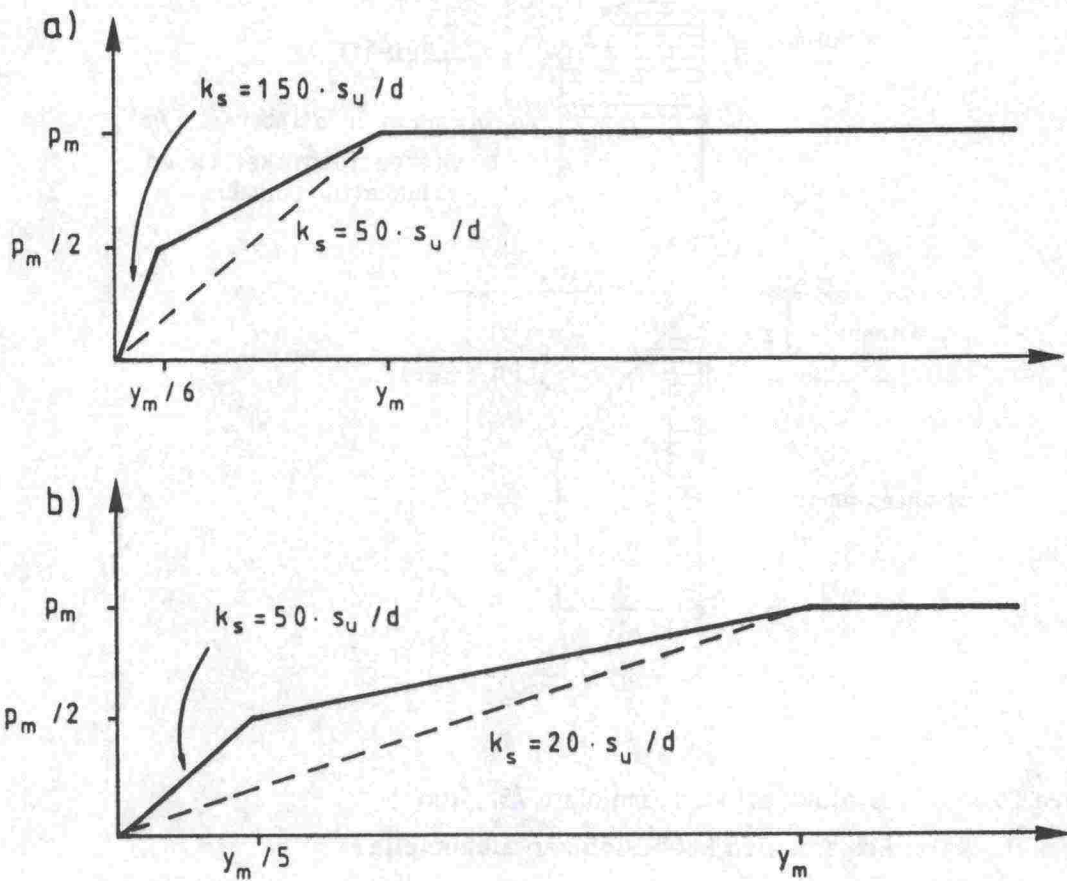
p_m = sivuvastuksen ääriarvo

y_m = vastaava siirtymä

Koska alustaluvut riippuvat kuitenkin suoraan maan kokoonpuristuvuudesta, olisi sitä tarkasteltava maan kokoonpuristuvuusmoduulin (M) kautta, jolloin $n_h = a \cdot \beta \cdot M/z$, missä kerroin $a = 0.74$ Terzaghin ja $a = 1.0$ Poulosin mukaan sekä kerroin $\beta = 0.83 - 0.95$ hiekalle Poissonin vakion vaihdeltaessa vastaavasti välillä $0.25 - 0.15$.

- o Koheesiomaan vaakasuora alustaluku vaihtelee rajoissa $k_s = 50 - 150 \cdot s_u/d$ lyhytaikaisella kuormituksella ja rajoissa $k_s = 20 - 50 \cdot s_u/d$ pitkäaikaisella kuormituksella. Kuvassa 28 a on esitetty todellista alustalukua lyhytaikaisella kuormituksella ja kuvassa 28 b pitkäaikaisella kuormituksella kohtuullisesti kuvaava tapa.

Koheesiomaan alustaluku oletetaan vakioksi syvyydestä riippumatta.



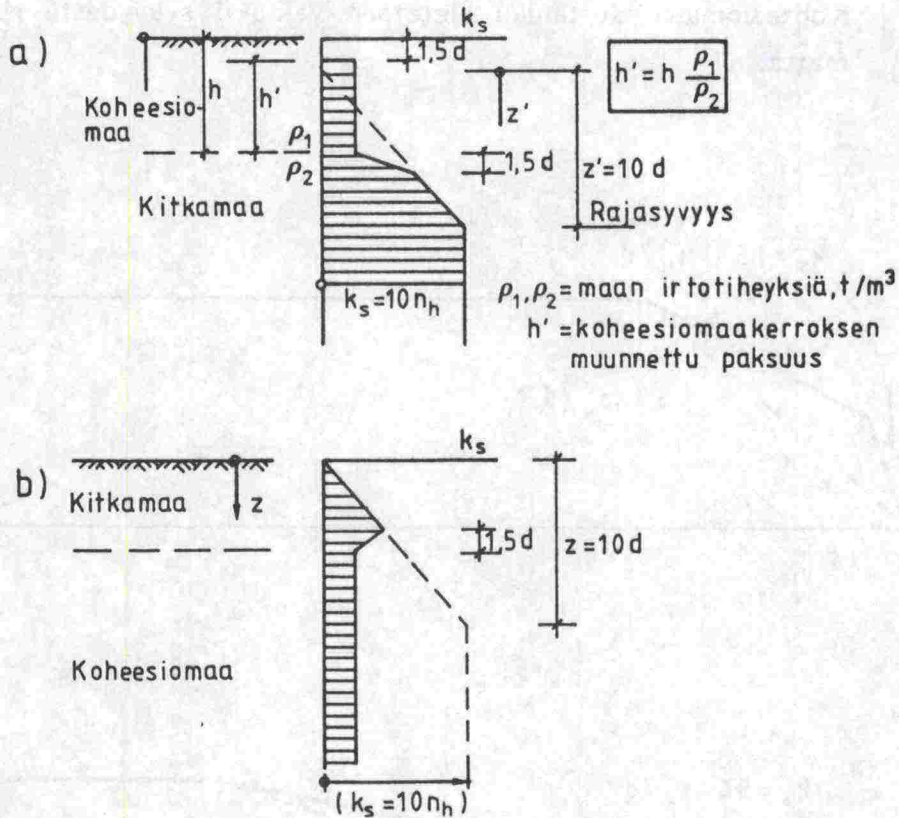
Kuva 28. Koheesiomaan alustaluvun määrittäminen.

a) lyhytaikainen kuormitus

b) pitkäaikainen kuormitus

Koheesiomaan alustaluku tulisi kuitenkin ensisijaisesti määrittää kokoonpuristuvuusmoduulin (M) kautta, jolloin $k_s = \beta \cdot M/d$, missä $\beta = 0.46 - 0.9$ savelle Poissonin vakion vaihdelta $0.4 - 0.2$ ja $\beta = 0.62 - 0.74$ siltile Poissonin vakion vaihdelta $0.35 - 0.3$.

- o Kuvassa 29 on esitetty alustaluvun määrittäminen erilaisissa kerrosrajoissa.



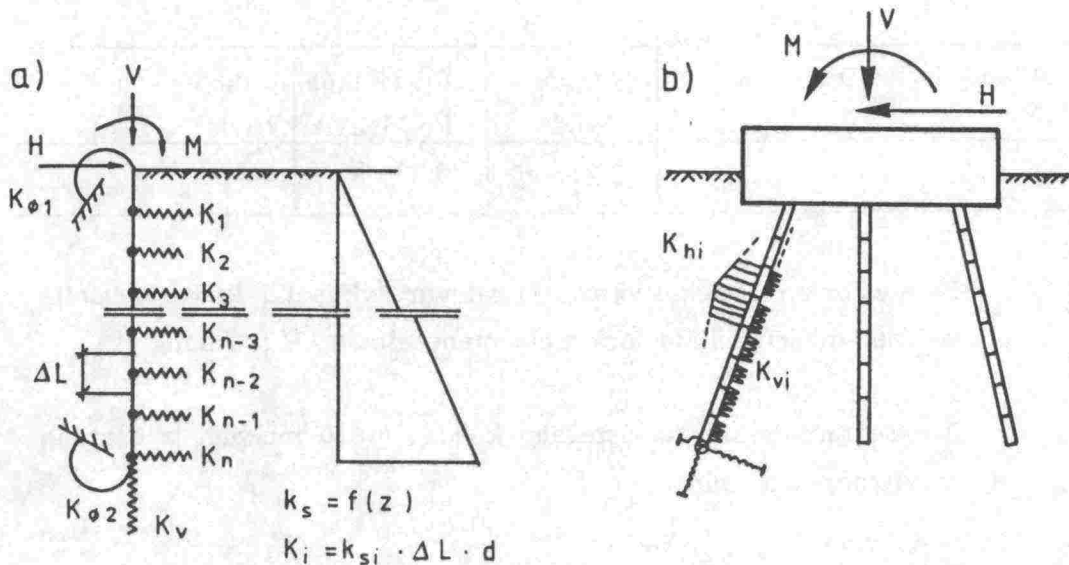
Kuva 29. Alustaluku eri kerrosrajoissa [3], kun
a) kitkamaa on koheesiomaan alapuolella
b) kitkamaa on koheesiomaan yläpuolella

4.67 Mitoitus staattiselle kuormitukselle

Staattisella mitoituksella tarkoitetaan paalun analysointia kuormitustilanteelle, jossa kuorma on ajan suhteen vakio ja jossa hitausvoimilla ei ole vaikutusta rakenteen rasitukseen.

Sivukuormitetun paalun analysoimiseksi on nykyisin käytössä useita kohtuullisen tarkkuuden omaavia käsinlaskentamenetelmiä. Tarkkuusvaatimusten kasvaessa on kuitenkin syytä suorittaa analyysi tietokoneen avulla, koska maan epälineaarinen käyttäytyminen johtaa laskennassa useisiin iteraatiokierroksiin.

Seuraavassa on esitetty mikrotietokoneille soveltuva laskentamalli, jossa maan staattiset ominaisuudet on kuvattu epälineaaristen vaakasuuntaisten jousien avulla ja paalu elementtimenetelmän (FEM) avulla. Paalun liikkeistä aiheutuvat reaktiovoimat keskitetään jousina elementtimallin solmupisteisiin. Jousien arvot voidaan määrittää esimerkiksi alustalukumenetelmän mukaan, kohta 4.66. Siirtymän ylittäessä vastaavan maan murtolujuuden (sivuvastuksen ääriarvon) iteroidaan elastoplastista sivupaine-siirtymä-funktiota. Menetelmän mukainen elementti-jousimalli, joka on käsittelyltään riippumaton jäykkyys-suhteen L/R ja L/T arvoista, on esitetty kuvassa 30. Paalun pään ja kärjen reunaehdot mallitetaan myös jousien avulla ja niiden tulee vastata mahdollisimman hyvin ylärakenteen toimintaa ja kärjen olosuhteita.



Kuva 30. Elementti-jousimallit.

a) yksittäinen paalu

b) paaluryhmä

4.68 Mitoitus sykliselle kuormitukselle

Mitoituksella sykliselle kuormitukselle tarkoitetaan paalun analysointia kuormitustilanteelle, jossa kuormitus on ajan suhteen muuttuva eikä hitausvoimilla pääsääntöisesti ole merkitystä rakenteen rasitukseen. Kuormitus voi olla suunnaltaan yksisuuntaista tai vaihtuvaa. Syklinen eli toistuva kuormitus heikentää maan lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia ja lisää siten vaakasiirtymän suuruutta verrattuna staattiseen kuormitustilanteeseen. Lisäys on sitä suurempi mitä löyhempää maa on. Syklisen kuormituksen taajuuden ylärajaksi oletetaan yleensä $f = 1$ Hz.

Syklisiin kuormituksiin voidaan lukea aaltokuormat, joiden merkitys suoraan paalua tai siltapilaria kuormittavaan on pienehkö. Kuitenkin aaltokuormitukset suurten perustuskasuunien, laivojen tai ahtojään välityksellä vaikuttavina on otettava huomioon.

- o Analysoitaessa sivukuormitettua paalua syklisille kuormille voidaan käyttää staattista alustalukumenetelmää, jossa käytetään taulukon 7 mukaisia muunnettuja alustalukuja. Taulukon arvot pätevät kitkamaalle ja määräytyvät maan tiiviyn mukaan.

Taulukko 7. Kitkamaan vaakasuorat alustaluvut k_{ss} syklisellä kuormituksella. k_s = staattinen alustaluku.

Suhteellinen tiiviyys D_r	< 0,35 löyhä	0,35 - 0,65 keskitiivis	> 0,65 tiivis
k_{ss}	$0,25 \cdot k_s$	$0,33 \cdot k_s$	$0,5 \cdot k_s$

Koheesiomaan vaakasuorat alustaluvut syklisellä kuormituksella voidaan määrittää Matlockin p-y menetelmän /5/ mukaan.

Juoksettumisvaara tarkistetaan kohdan 4.610 mukaan ja otetaan tarvittaessa huomioon.

Syklisen kuormituksen normaaleilla taajuuksilla ei vaimennuksen vaikutus ole merkittävä. Tästä syystä laskelmissa ei yleensä tarvitse ottaa vaimennusta huomioon. Poikkeuksen muodostaa tilanne, jossa kuormituksen taajuus on lähellä dynaamisen kuormituksen taajuuden alarajaa (1 Hz). Tällöin on maan ja paalun ominaistaajuuudet tarkistettava kohdassa 4.69 esitetyllä tavalla ja tarpeen vaatiessa vaimennus otettava huomioon.

4.69 Mitoitus dynaamiselle kuormitukselle

Mitoituksella dynaamiselle kuormitukselle tarkoitetaan paalun analysointia kuormitustilanteelle, jossa kuormitus on ajan suhteen muuttuvaa, hitausvoimien osuus paalun rasituksissa merkittävä ja kuormituksen taajuus vähintään 1 Hz. Dynaamisiin kuormituksiin voidaan lukea liikkuvan kiintojään murskautumisen siltapilareja tai -paaluja vastaan, puuskittaisen tuulen sekä ajoneuvojen ja alusten törmäysten aiheuttamat kuormat.

Dynaamisessa analyysissä on tarkistettava, etteivät pakkovoiman taajuus ja koko rakenteen ominaistajuus ole lähellä toisiaan, koska tällöin siirtymät kasvavat oleellisesti ja maa saattaa juoksettua. Juoksettumisvaara tarkistetaan kohdan 4.610 mukaan. Jos herätetaajuuden ja systeemin (koko rakenteen) ominaistajuuden suhde on resonanssialueella eli välillä 0,5 ja 2, on vaimennuksen vaikutus otettava huomioon.

Pyrittäessä systeemin tarkkaan dynaamiseen analyysiin on otettava huomioon koko rakenteen ominaisuudet ja suoritettava mitoitus tietokoneen avulla. Tällöin on kiinnitettävä erityistä huomiota myös lähtötietojen oikeaan mallintamiseen. Atk-menetelmistä soveltuu analysointiin parhaiten elementtimenetelmä, josta on nykyisin olemassa tehokkaita sovellutusohjelmistoja.

Periaatteet dynaamisen analyysin suorittamiseksi ovat /11/:

1. Moodi superpositiomenetelmä
 - 1.1 Ominaistaajuuksien ja -muotojen määrittäminen
 - 1.2 Pakkovärähtelyanalyysi (harmonisen voiman aiheuttama amplitudi, nopeus ja kiihtyvyys)
2. Askel-aika-menetelmä (impulssimaisille kuormille ja epälineaarille rakenteelle)
 - o Elementtimenetelmään perustuvat sovellutusohjelmistot vaativat staattisen mallin parametrien lisäksi massatiheyden ja suhteellisen vaimennusasteen. Mikäli tarkempaa selvitystä ei tehdä, voidaan vaimennusasteeksi ottaa materiaalivaimennuksena $\xi = 5 \%$. Vaimennus voidaan määrittää myös koekuormitusten perusteella seuraavasti;

$$\xi = 1/(2 \pi) \cdot \ln (s_n/s_{n+1}) \quad (26)$$

s_n ja s_{n+1} ovat vastaavasti siirtymän maksimiarvo sekä tätä seuraavan syklin siirtymä. Mikäli herätetaajuus on suurempi kuin maakerroksen ominaistaajuus, kehittyy myös viskoosia vaimennusta (säteilyvaimennusta). Vaimennussuhdetta voidaan tällöin arvioida seuraavasti;

$$\xi = c/(2 \sqrt{km}) \quad (27)$$

missä vaimennuskerroin vaakasuuntaiselle kuormitukselle

$$c = 2 \cdot \rho \cdot d \cdot (v_p + v_s) \quad (28)$$

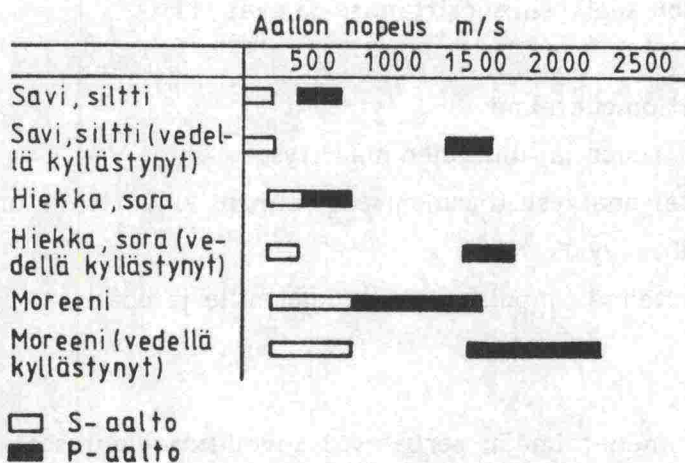
paalun pituusyksikköä kohti ja k = systeemin staattinen jäykkyys (= F/x , missä x = vaakasiirtymä yksikkövaakakuormasta $F = 1$ kN).

ρ = maan irtotiheys

d = paalun halkaisija

v_p = puristusaallon nopeus (P-aalto) (kuva 31)

v_s = leikkausaallon nopeus (S-aalto) (kuva 31)



Kuva 31. P- ja S-aaltojen etenemisnopeus eri maalajeissa /1/.

Mikäli on olemassa vaara paalun irtoamiselle maasta, on vaimennuksen arviointi suoritettava varovaisuutta noudattaen. Sopivissa olosuhteissa saattaa irtoaminen tapahtua jo hyvin pienillä siirtymillä, jolloin vaimennusta ei enää tapahdu.

Maakerroksen ja systeemin ominaistaajuus voidaan likimääräisesti määrittää myös seuraavilla tavoilla;

Maakerroksen ominaistaajuus;

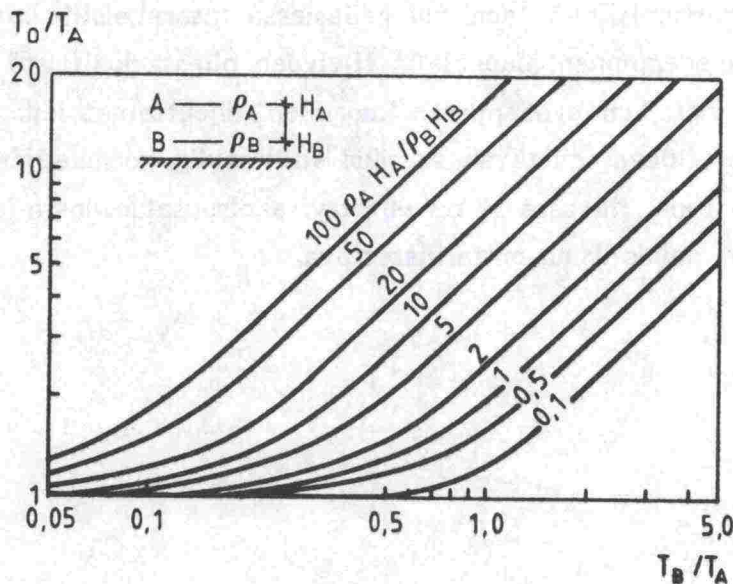
$$f_m = v_s / (4 \cdot H) \quad (29)$$

H = maakerroksen paksuus

Kun paalu ulottuu maakerroksen läpi kovaan pohjaan, voidaan käyttää kaavaa;

$$f_m = (0,6/\pi) \cdot (v_s/L) \cdot \sqrt{L/d} \quad (30)$$

Jos maa koostuu kahdesta kerroksesta saadaan ominaistaajuus kuvasta 32. Ensin lasketaan kerrosten A ja B ominaisheilahdusajat ($T = \frac{1}{f}$) T_A ja T_B . Tämän jälkeen saadaan kerrosten yhdistetty ominaisheilahdusaika kerrosten irtotiheyksien ρ_A ja ρ_B sekä kerrosten paksuuksien z_A ja z_B avulla.



Kuva 32. Kahden maakerroksen yhdistetyn ominaisheilahdusajan määrittäminen.

Jos maassa on enemmän kuin kaksi kerrosta, saadaan ominaisheilahdusaika seuraavasti:

- Määritetään kahden ylimmän kerroksen yhdistetty ominaisheilahdusaika.
- Käsitellään kahta ylintä kerrosta yhtenä kerroksena ja lasketaan kahden ylimmän kerroksen ja kolmannen kerroksen yhdistetty ominaisheilahdusaika.
- Samalla tavalla jatketaan kallion pintaan asti.

Systeemin vaakasuuntainen ominaistajuuus;

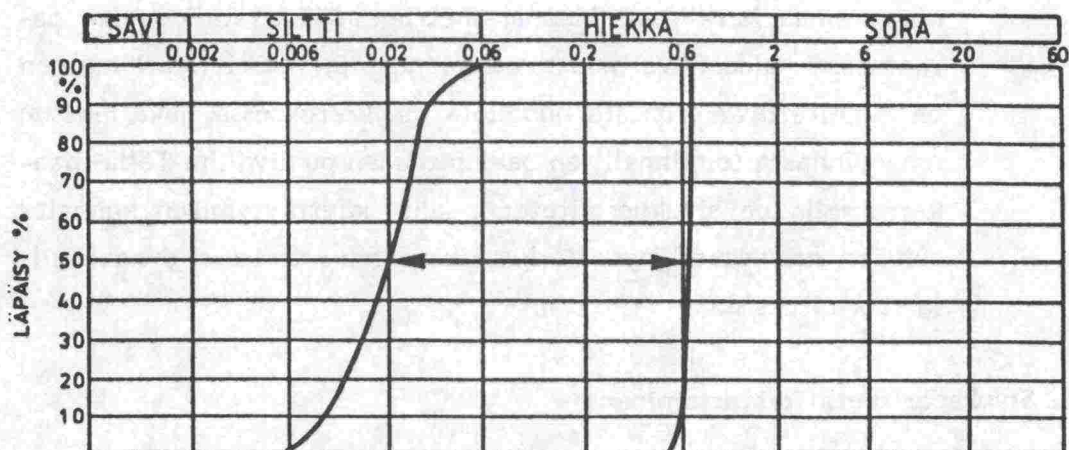
$$f_s = 1/(2 \pi) \cdot \sqrt{k/m} \quad (31)$$

Kaavassa m = systeemin massa ja k = staattinen jäykkyys ($= F/x$, joka saadaan yksikkövaakakuorman $F = 1$ kN aiheuttaman siirtymän x avulla).

4.610 Juoksettuminen

Juoksettuminen tapahtuu, jos kuormituksen aiheuttama huokospaineen lisäys maaperässä ylittää aikaisemmin vallinneen tehokkaan jännityksen arvon. Maan juoksettumisen mahdollisuus on otettava huomioon syklisillä ja dynaamisilla kuormituksilla.

- o Juoksettumisilmiö tapahtuu pääasiassa tasarakeisilla kitkamailla pohjavedenpinnan alapuolella tiiviiden ollessa kriittistä tiiviyttä pienempi, kun dynaamisten kuormien aiheuttamat leikkausjännitykset tulevat riittävän suuriksi vallitseviin normaalijännityksiin verrattuna. Kuvassa 33 on esitetty rakeisuusalue, jossa juoksettumisen mahdollisuus on tarkistettava.



Kuva 33. Juoksettumisherkkä rakeisuusalue /2/.

Juoksettumisvaaraa voidaan ehkäistä on ensisijaisesti maata tiivistämällä tai tehokasta jännitystä lisäämällä.

4.611 Varmuuden huomioon ottaminen mitoituksessa

Paalujen sivukapasiteetin mitoituksessa suositellaan käytettäväksi rajatilamenetelmää. Tällöin osavarmuusluvut sijoitetaan sivukuormitettua paalua mitoitettaessa ensisijaisesti materiaaliparametreihin ja vaakakuormaan, mutta joissakin tapauksissa myös siirtymään. Myöskin kokonaisvarmuuslukumenetelmää voidaan käyttää.

- o Kun mitoitetaan paalun sivukapasiteettia, materiaaliparametrit jaetaan osavarmuusluvuilla ja kuormat kerrotaan osavarmuusluvuilla. Jos sivukapasiteetin varmuutta arvioidaan siirtymän mukaan, voidaan varmuus sisällyttää sallitun siirtymän arvioihin. Tällöin kuormat otetaan ominaiskuormina.

Kun paalu mitoitetaan pakkovoimasta tai maanpaineesta aiheutuvalla sivukuormalla, materiaaliparametrit puolestaan kerrotaan osavarmuusluvuilla ja varmuus sivukuormalle tulee tätä kautta.

Käytettäessä kokonaisvarmuuslukumenetelmää, on kokonaisvarmuuden oltava vähintään $F \geq 2.2$ laskennallisesti mitoitettuna ja vähintään $F \geq 1.8$ staattisesti koekuormitettuna. Joskus on tarpeen tarkistaa rajatilamenetelmää käytettäessä kohtuullinen varmuustaso myös kokonaisvarmuuslukumenetelmällä.

Vaikka varmuustason määrittämisessä sovelletaan voimassa olevia ohjeita, on kuitenkin tarpeen vaatiessa sovellettava myös geoteknikon omaa harkintaa. Maaparametrien määrittystarkkuuden parantuessa voidaan varmuustasoa pienentää. Määrittystarkkuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota maakerroksessa, joka ulottuu maanpinnasta toiminnallisen paalupituuden puoliväliin. Tällä maakerroksella on sivukuormitetun paalun käyttäytymisen kannalta selvästi suurin merkitys. Merkitys korostuu erityisesti dynaamisilla kuormituksilla.

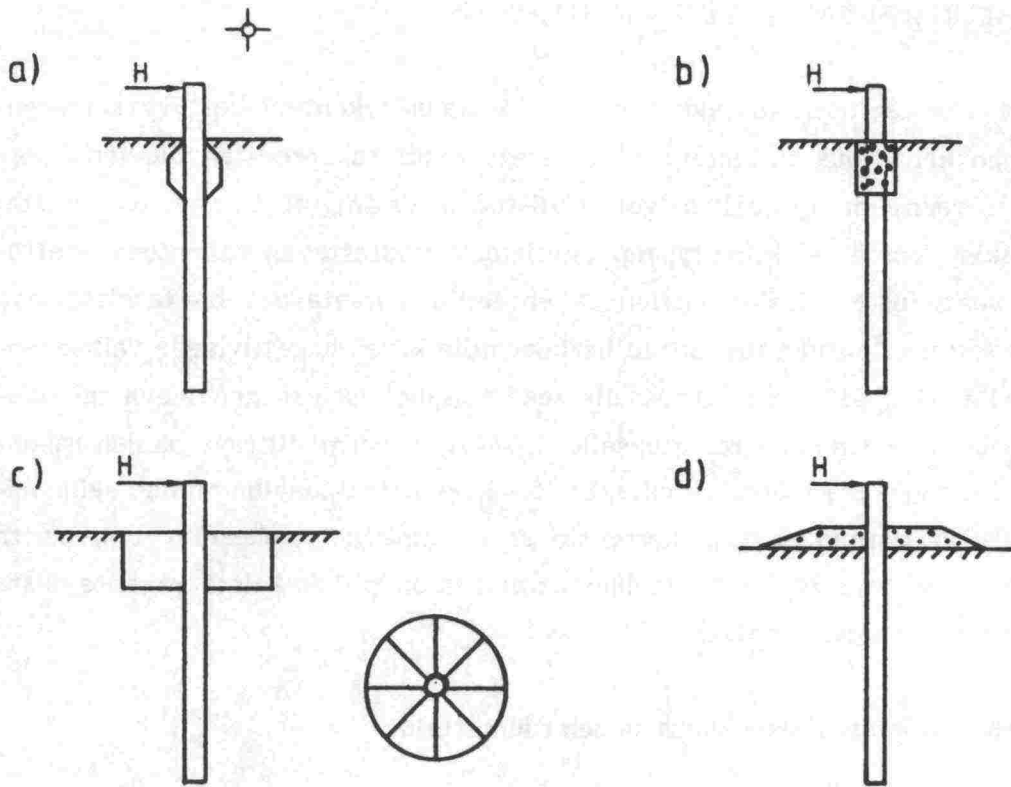
4.612 Sivukapasiteetin kasvattaminen

Paalun sivukapasiteettia voidaan lisätä parantamalla maan lujuusominaisuuksia tai muilla rakenteellisilla keinoilla, joilla ensisijaisesti kasvatetaan paalun yläosan poikkileikkausta.

- o Maan lujuutta on mahdollista parantaa tiivistämällä tai injektoidulla maaperää.

Rakenteellisia keinoja voivat olla esimerkiksi paaluun hitsatut siivekkeet tai betonikaulus. Näitä esittävät kuvat 34 a ja b. Huomattava vaakakapasiteetin lisäys voidaan saada aikaan kuvassa 34 c esitetyllä teräsheikkoratkaisulla. Muita keinoja ovat sora- ja hiekkatäyttö maan pinnalla (kuva 34 d).

Käänteisiä keinoja voivat olla sivukuormien vähentämiseksi tehtävät kevennyskaivut ja kevyet täytöt.



Kuva 34. Mahdollisia ratkaisuja sivukapasiteetin lisäämiseksi.

5. PAALUN RAKENTEELLINEN KANTAVUUS

Paalun rakenteellisen kantavuuden määrää paalun rakenteen kestävyys. Rakenteellinen kantavuus tarkistetaan perustettavasta rakenteesta tulevien kuormien suhteen, jolloin paaluun voi kohdistua myös taivutusta vaakakuormista, epäkeskisyyksistä tai kiinnitysmomenteista. Perustettavan rakenteen asettamien vaatimusten lisäksi paalun rakenteellinen kantavuus on tarkistettava nurjahdukselle, maan välittämille lisäkuormille kuten negatiiviselle vaippahanaukselle, vinopaalujen taivutukselle sekä toispuoleisen maanpaineen tai sivuvastuksen aiheuttamalle taivutukselle. Lisäksi on varmistuttava paalun rakenteen kestävydestä lyöntivoimalle. Lyötävän teräspuikipaalun minimi seinämävahvuus on 10 mm. Paalun korroosio ei vähennä lyönninkestävyyttä, mutta korroosiovähennys on otettava huomioon paalun pitkäaikaista rakenteellista kantavuutta määritettäessä.

5.1 Paalun rakenteellisen kantavuuden suunnittelu

1. Määritetään paalun sallitut materiaaliännitykset paalumateriaalin ja pohjasuhteiden perusteella. Lohkareisissa pohjasuhteissa saattaa olla paikallaan pienentää normaalisti sallittuja staattisia jännityksiä.
2. Tarkistetaan paalun rakenteen kestävyys määräävissä kuormitustapauksissa. Paalun korroosiovähennys otetaan huomioon.
3. Määritetään sallitun geoteknisen kantavuuden vaatima lyöntivoima ja tarkistetaan lyöntijännitykset huomioon ottaen varmuuskerroin. Paalun korroosiota ei tarvitse tällöin ottaa huomioon.

5.2 Rakenteiden mitoitus

5.21 Teräspuikipaalu

Teräspuikipaalu on paalu, jonka sisäosa valmiissa rakenteessa on maataytteen tai tyhjä kärjestä avoimella paalulla ja tyhjä suljetulla paalulla. Paalun rakenteellinen kantavuus koostuu teräspuikkeen kantavuudesta.

5.211 Lyöntijännitykset

Paalun sallitut lyöntijännitykset määritetään LPO-87 kohdan 3.473 mukaan. Paalun korroosiota ei oteta huomioon.

- o Paalun lyönti aiheuttaa paaluun sekä puristus- että vetojännityksiä. Iskun aiheuttama ominaiskuorma saadaan kertomalla jännitys paalun pinta-alalla. Murtorajatilatarkasteluissa suositellaan kuorman osavarmuuskertoimeksi 1,1. Lyöntijännitystä voidaan arvioida kaavalla

$$\sigma_{\max} = f_w \cdot f_o \cdot \sqrt{\gamma H E} \quad (32)$$

γ =	teräksen tilavuuspaino = 79 kN/m^3
E =	teräksen kimmomoduuli = $2,1 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$
f_o =	lyöntikalustosta riippuva kerroin = $0,5 - 1,0$
f_w =	rakennuspaikan pohjaolosuhteista riippuva kerroin
H =	järkäleen pudotuskorkeus

Ellei paalutuskalustosta ole tarkempaa tietoa voidaan kertoimelle f_o antaa keskimääräinen arvo $f_o = 0,75$. Lyötäessä terästukipaalua kalliota vastaan saa f_w arvoja $1,6 - 1,9$. Paalun kärjen ollessa tiiviissä maassa saadaan usein $f_w = 1,3 - 1,5$.

Mikäli kohteessa suoritetaan dynaamisia mittauksia, esimerkiksi PDA-mittauksia, pystytään lyöntijännitykset määrittämään.

5.212 Käyttöjännitykset

Teräsputkipaalun sallittu keskeinen puristusjännitys määräytyy paalutusluokan perusteella. Suuri teräsputkipaalu kuuluu paalutusluokkaan I A, I B tai II. Paalutusluokka määritetään LPO-87 kohtien 3.3 ja 3.412 mukaan. Sallittu keskeinen puristusjännitys määritetään LPO-87 kohdan 3.4231 mukaan.

Jos teräsputkipaaluun kohdistuu taivutus- ja leikkausrasituksia, määritetään paalun rakenteellinen kantavuus normaalivoimalle ja taivutukselle sekä leikkaukselle Suomen rakentamismääräyskokoelman teräsrakenteita koskevien ohjeiden ja niitä täydentävien TVH:n ohjeiden mukaan /18/.

Käyttöjännityksiä määritettäessä on otettava huomioon paalun korroosiovähennys.

5.213 Nurjahdus

Teräsputki-paalun rakenteellinen kantavuus nurjahdukselle määritetään LPO-87 kohdan 3.475 mukaan ottaen huomioon paalun korroosiovähennys.

5.22 Liittorakennepaalu

Liittorakennepaalu on teräsputki-paalu, jonka sisäosa valmiissa rakenteessa on täytetty betonilla täydellisesti yhdessä toimivaksi rakenteeksi.

5.221 Lyöntijännitykset

Rakennettaessa liittorakennepaalia teräsputken upotuksessa sallitut lyöntijännitykset määritetään kohdan 5.211 mukaan. Teräsputken upotus voidaan suorittaa myös täryjuntalla.

5.222 Käyttöjännitykset

Liittorakennepaalun rakenteellinen kantavuus puristukselle, normaalivoimalle ja taivutukselle sekä leikkaukselle määritetään Liittorakenteet Suunnitteluohjeet 1988 kohdan 3.1 ja niitä täydentävien TVH:n ohjeiden mukaan ottaen huomioon paalun korroosiovähennys.

5.223 Nurjahdus

Liittorakennepaalun rakenteellinen kantavuus nurjahdukselle määritetään LPO-87 kohdan 3.475 mukaan ottaen huomioon paalun mahdollinen korroosiovähennys. Paalun taivutusjäykkyys määritetään kaavasta

$$EI = E_{cd}I_c + E_sI_s + E_rI_r \quad (33)$$

E_{cd} = betonin kimmomoduuli

I_c = betonipoikkileikkauksen neliömomentti

E_s = betoniterästen kimmomoduuli

I_s = betoniterästen neliömomentti

E_r = teräsputken kimmomoduuli

I_r = teräsputken neliömomentti

5.23 Teräskuorellinen betonipaalu

Teräskuorellinen betonipaalu on paalu, jossa teräskuori toimii ainoastaan kaivu- ja valumuottina. Paalun rakenteellinen kantavuus koostuu teräskuoren sisään valetun teräsbetonin kantavuudesta.

5.231 Lyöntijännitykset

Kohdan 5.221 mukaan.

5.232 Käyttöjännitykset

Teräskuorellisen betonipaalun rakenteellinen kantavuus puristukselle, normaallivoimalle ja taivutukselle sekä leikkaukselle määritetään Betoninormien pila-reita koskevien ja niitä täydentävien TVH:n ohjeiden mukaan /19/.

- o Vedenalaisessa valussa betonin lujuusluokka on yleensä K 30, joka edellyttää sementtimäärää $350 - 400 \text{ kg/m}^3$ vesisementtisuhteen ollessa enintään 0,6.

5.233 Nurjahdus

Teräskuorellisen betonipaalun rakenteellinen kantavuus nurjahdukselle määritetään Betoninormien, niitä täydentävien TVH:n ohjeiden ja SPO-78 kohdan 3.342 mukaan.

5.3 Korroosion huomioon ottaminen

Teräspaalun korroosio pitää ottaa huomioon määritettäessä paalun rakenteellista kantavuutta käyttötilassa. Teräsputkipaalussa, jossa paalu on umpinainen kotelo, tapahtuu korroosiota ainoastaan paalun ulkovaipalla. Myöskin kärjestä avoimen paalun kärjen ollessa pysyvästi alimman pohjavedenpinnan alapuolella ja paalun yläpään ollessa suljettu, muodostaa paalun sisäosa umpinaisen kotelon. Mikäli teräsputkipaalu ei ole umpinainen kotelo, on korroosio otettava huomioon myös sisävaipalla. Korroosion suojausmenetelmiä ovat seuraavat

- ylimitoitus
- erikoisteräks
- katodinen suojaus
- orgaaniset ja epäorgaaniset pinnoitteet
- betoniverhoilu

5.31 Ylimitoitus

- o Paalumateriaalin ainepaksuuden ylimitoitus ei varsinaisesti ole korroosiosuojaus. Ylimitoituksella kasvatetaan ainespaksuutta riittävässä määrin, että rakenteen arvioidun käyttöiän aikana tapahtuvan korroosion jälkeenkin ainespaksuus on riittävä vastaanottamaan rakenteelle suunnitellun kuorman. Ylimitoitus on yleisimmin käytetty ja tavallisesti halvin menetelmä.

Korroosiovähennys mitoitetaan seuraavasti paalun eri korkeustasoilla 100 käyttövuotta ruostuvaa pintaa kohti.

-	> HW +1,0	3 - 4 mm
-	HW +1,0...NW -1,5 (aaltovyöhyke)	6 - 10 mm
-	NW -1,5... merenpohja -1,5	3 - 4 mm
-	< merenpohja -1,5	2 mm ¹⁾

Alarajaa sovelletaan puhtaille järviolueille ja ylärajaa merialueille.

- 1) Mikäli paalu on liejussa, rikki- tai sulfidipitoisessa maassa tai jätetäytteenä, on korroosiovähennyksen suuruus aina erikseen määritettävä.

5.32 Erikoisteräket

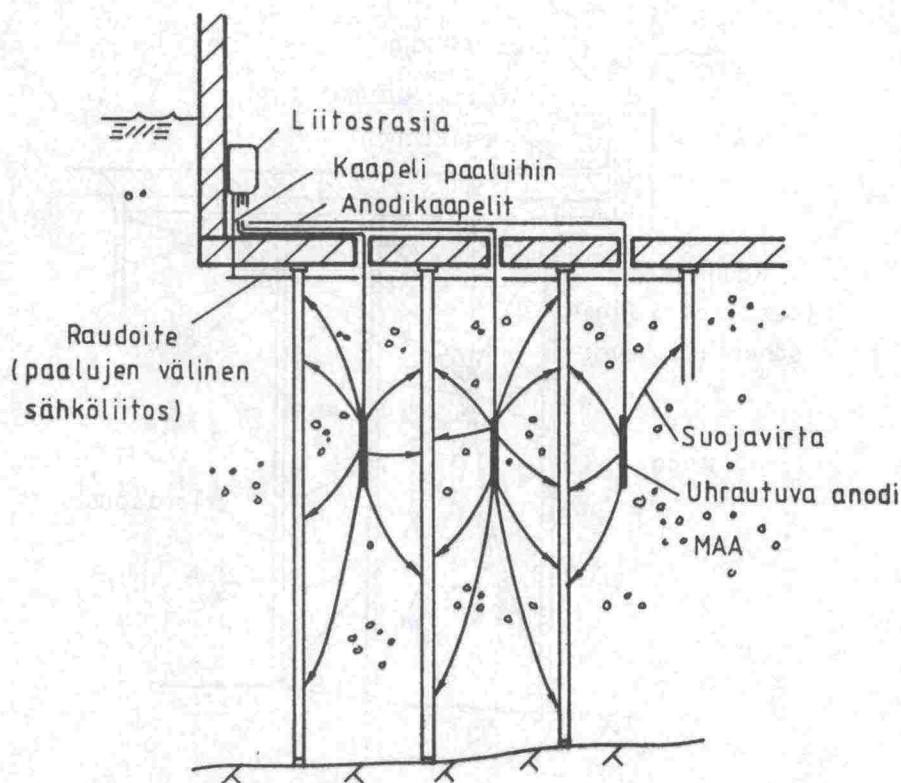
- o Erityisten korroosiota kestävien seosterästen käyttö ei myöskään ole varsinainen korroosiosuojaus. Tavanomaisten hiiliterästen koostumuksen vaihtelun alueen pienillä pitoisuuksilla ei ole mitään merkitystä korroosionopeudelle maassa. Merkittävä suoja korroosiota vastaan saavutetaan ainoastaan käyttämällä ns. ruostumattomasta teräksestä valmistettuja paaluja.

5.33 Katodinen suojaus

- o Katodinen suojaus aikaansaadaan lähettämällä tarkkaan mitoitettu tasavirta maan kautta teräsvaipalle, jolloin korroosiovirta pakotetaan kulkemaan päinvastaiseen suuntaan kuin teräksen syöpyessä tapahtuu. Tällöin teräspaalu varautuu negatiivisesti siten, ettei teräksen ja maan välisiä sähkökemiallisia reaktioita pääse tapahtumaan. Menetelmässä edellytetään, että maahan asennetaan paalujen väliin joukko anodeja samalla kun paalut yhdistetään

sähköisesti toistensa kanssa. Vaadittava tasavirta, ns. suojavirta, voidaan aikaansaada kahdella eri tavalla, joiden mukaan menetelmää kutsutaan joko uhrautuvalla anodilla varustetuksi katodisuojaukseksi tai pakotusvirtaiseksi katodisuojaukseksi.

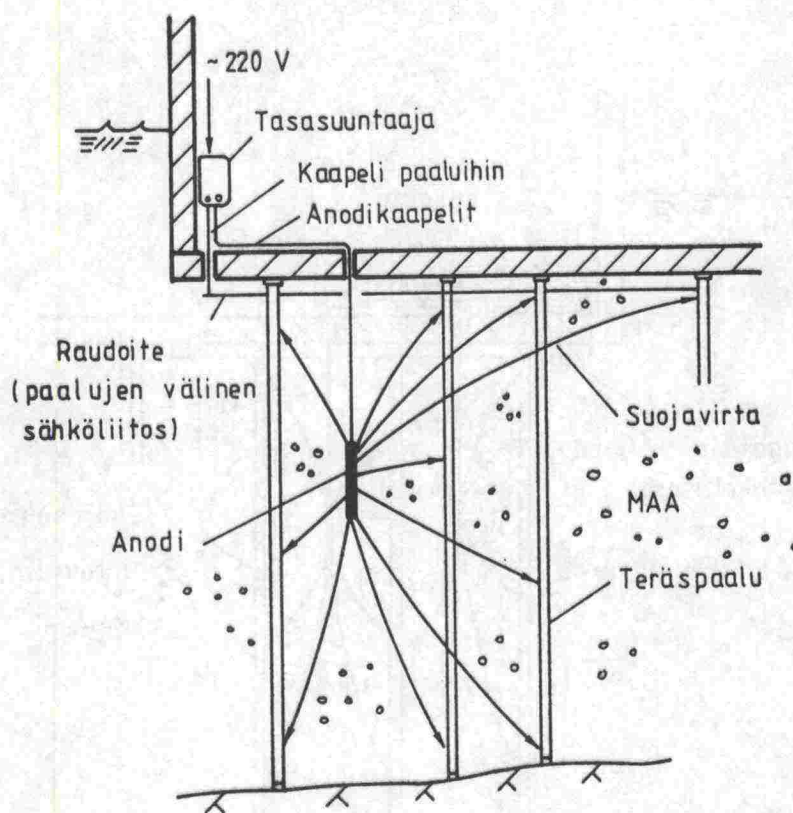
Uhrautuva-anodi -menetelmässä on se etu, ettei siinä tarvita sähköisiä komponentteja. Uhrautuva anodi aikaansaa itse galvanisesti tarvittavan suojavirran (kuva 35). Tällöin huolto- ja valvontakustannukset jäävät pieniksi. Haittapuolena on se, että uhrautuvat anodit (magnesium ja sinkki) tulee vaihtaa uusiin säännöllisin väliajoin (10 - 15 vuotta) ja että tarvittava anodipuikkojen lukumäärä on huomattavasti suurempi kuin pakkovirtasuojauksessa. Uhrautuva-anodi -järjestelmä on taloudellisesti pakkovirtasuojausta edullisempi ainoastaan pienissä rakennuskohteissa. Uhrautuva-anodi -järjestelmällä tarpeellisen suojavirran aikaansaaminen on vaikeaa mikäli maan ominaisvastus on suuri.



Kuva 35. Katodinen suojaus uhrautuva-anodi -periaatteella /16/.

Pakkovirtasysteemin (kuva 36), etuina on se, että uusimpia anodimateriaaleja, mm. magnetiitti (rautaoksidimuoto), ei tarvitse vaihtaa sekä se, että ulkoista virtalähdettä käyttämällä virta voidaan sovittaa kulloisiinkin olosuhteisiin sopivaksi, myös maapohjissa, joiden ominaisvastus on korkea. Haittapuolina menetelmässä on muun muassa, että tarvittavat tasavirtasuuntaajat tarvitsevat säännönmukaista valvontaa ja huoltoa. Pienet toimintahäiriöt ja keskeytykset virrassa eivät ole haitaksi, mikäli korroosionopeus maassa on hidas.

Katodisuojausta sovellettaessa on otettava huomioon, että muut maan kanssa kosketuksissa olevat metallijohdot ja -rakenteet kohteen lähellä tulee myös sulkea suojauksen piiriin, jotta ne eivät kärsi vuotovirtakorroosiosta.



Kuva 36. Katodinen suojaus pakkovirtausperiaatteella /16/.

5.34 Orgaaniset ja epäorgaaniset pinnoitteet

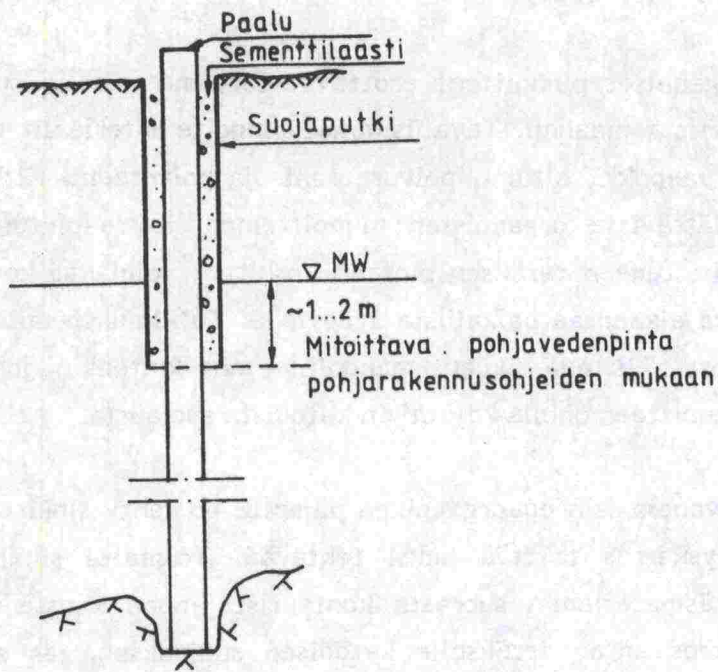
- o Orgaaniset pinnoitteet erottavat teräsmateriaalin suorasta kontaktista maahan. Tavallisimmat pinnoitemateriaalit ovat epoksi, tervaepoksi, bitumi, polyuretaani ja polyeteeni. Kitkamaissa on pelättävissä orgaanisten pinnoitteiden poisraapiutuminen. Näin paljastuneen teräksen pintaan keskittyy voimakas korroosiovirta, joka aikaansaa paikallista syöpymää. Tutkimuksia aiheesta ei ole tehty. Riittävä suojaus mahdollistetaan kuitenkin, jos orgaanisen pinnoitteen ohella käytetään katodista suojasta.

Tavanomaisin epäorgaaninen pinnoite on tehty sinkittämällä. Sinkityskerros täyttää kaksi tehtävää. Toisaalta sinkitys erottaa teräsmateriaalin suorasta kontaktista maan kanssa ja toisaalta kerros antaa teräkselle katodisen suojauksen, jos se paljastuu sinkin naarmuuntuessa. Sinkkikerroksen suojausvaikutus päättyy kun kerros on hävinnyt sinkin oman syöpymisen vaikutuksesta.

5.35 Betoniverhoilu

- o Paalun verhoilu betonivaipalla estää teräspaalun ja ympäröivän maan suoran kosketuksen (kuva 37). Samalla betonin korkea emäksisyys aikaansaa teräksen pinnalle suojaavan oksidikerroksen.

Betoniverhoilu voidaan rajoittaa myös suojaamaan ainoastaan paalun ylin osa, joka usein sijaitseekin korroosioalttiimmassa kerroksessa. Valu voidaan tehdä joko valaen betonimassa esiporattuun reikään tai lyömällä paalun lyönnin jälkeen paalun päälle putki, johon on tehty päätelevy paalun muotoon sovittaen. Putken lyönnin jälkeen välitila täytetään sementtilaastilla.



Kuva 37. Korroosiosuojaus betoniverhouksella.

6. PAALUT JA NIIDEN VARUSTEET

6.1 Putkien materiaali- ja laatuvaatimukset

Suunnitteluohjeen soveltamisalueella teräsputkipaalut ovat yleensä hitsattuja teräsputkia. Putket valmistetaan kuumavalssatusta teräsnauhasta joko pituus- tai kierresaumahitsaamalla. Myös muilla menetelmillä valmistettuja teräsputkia voidaan käyttää, kun ne täyttävät tässä ohjeessa esitetyt laatuvaatimukset.

6.11 Teräslajit

Teräsputkipaalujen materiaaleina käytetään tavallisesti SFS 200 mukaisia yleisiä rakenneteräksiä. Vakioteräslaji on Fe 52 ja laatuluokka C tai D rakenteen tai paalutustyön edellyttämästä laatuluokasta riippuen (kts. 6.12).

6.12 Laatuluokan valinta

Teräsputkipaaluun kohdistuvat käytön aikaiset rasitukset edellyttävät Suomen olosuhteissa harvoin vaativamman kuin laatuluokan C käyttämistä.

Laatuluokan D käyttämistä suositellaan silloin, kun rakenteen alin käyttölämpötila on alle -20°C ja yläpuoliset rakenteet liitetään suoraan hitsaamalla paaluihin tai paalutustyö tehdään iskukalustolla lämpötilassa alle -20°C .

Laatuluokan valintaa on käsitelty yksityiskohtaisemmin viitteessä /15/.

6.13 Mitat ja tekniset toimitusehdot

Mittojen ja teknisten toimitusehtojen osalta paaluputkiin sovelletaan putkipalkkistandardia SFS 5001 seuraavin tarkennuksin:

Toleranssit:

Ulkohalkaisija	$\pm 0,5 \%$	ympärysmistä laskettuna
Seinämänpaksuus	$+ 10 \%$ $- 5 \%$	
Pituus	$- 0$ $+50 \text{ mm}$	
Suoruus	$< 0,1 \%$	pituudesta
Pään tasomaisuus	$< 2 \text{ mm}$	
Pään suorakulmaisuus	$< 0,5 \%$	ulkohalkaisijasta tai 4 mm
Pyöreys	$R \leq 2 \%$; $R = 200 \frac{d_{\text{amax}} - d_{\text{amin}}}{d_{\text{amax}} + d_{\text{amin}}}$	
	$d_{\text{amax}} =$	suurin mitattu ulkohalkaisija
	$d_{\text{amin}} =$	pienin mitattu ulkohalkaisija

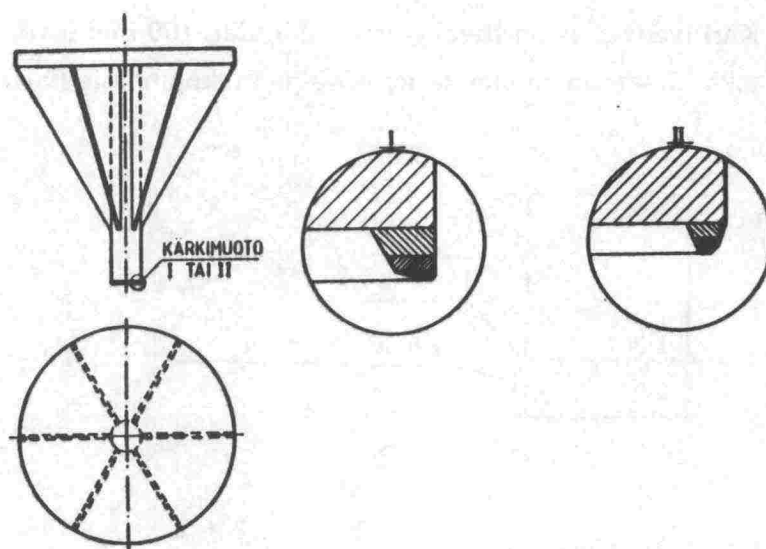
6.2 Kalliokärki

Kalliokärki mitoitetaan puristusrasituksille siten, että kärkikappale ja -tappi kestävät puristusjännitystä vähintään yhtä paljon kuin paalu. Kärkitapin kiinnitys mitoitetaan vetorasituksella siten, että lyönnin aiheuttamat vetoaallot eivät irroita kärkitappia.

- o Puristusrasitusta paaluun kohdistuu sekä paalun upotuksessa että valmiissa rakenteessa. Kärkitapin ja paalun välissä kärkikappale mitoitetaan teräsrakenteena siten, että se siirtää lyönninaikaiset ja valmiin rakenteen kuormitukset kärkitapin ja paalun välillä.

Vetorasitusta kärkitappiin kohdistuu paalun upotuksessa kärjen ollessa vielä löyhässä kerroksessa. Suuria teräspaaluja lyödessä pudotus- tai dieseljärkeleellä voi kiihtyvyys olla $1000 - 2000 \text{ g}$.

Valmiissa rakenteessa mitoitus suoritetaan teräsrakenteita koskevien ohjeiden mukaan. Kalliokärjen kiinnitys paaluun suoritetaan hitsaamalla. Kuvassa 38 on esitetty tyyppikuva kalliokärjestä.

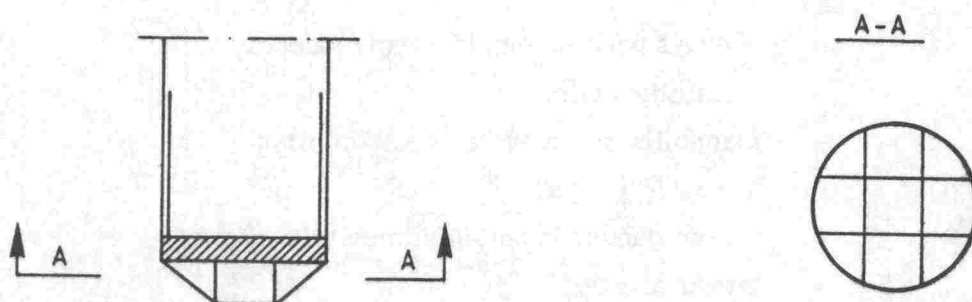


Kuva 38. Tyypipiirustus kalliokärjestä.

6.3 Pohjalevy

Pohjalevy mitoitetaan puristusrasitukselle samoin kuin kalliokärki (kohta 6.2).

- o Pohjalevy tehdään yleensä teräslevystä, joka hitsataan paaluun. Pohjalevyä voidaan myös vahvistaa erilaisin teräsrakennelmin, joista esimerkki on esitetty kuvassa 39.

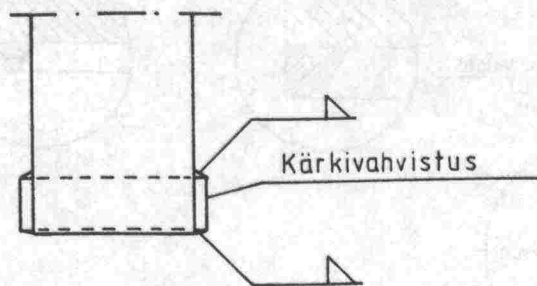


Kuva 39. Teräslevyillä vahvistettu pohjalevy.

6.4 Kärkivahvistus

Kärkivahvistusta käytetään kärjestä avoimissa paaluissa sellaisissa pohjaolosuhteissa, joissa on vaarana kärjen rikkoutuminen paalua upotettaessa. Kärkivahvistus lisää geoteknistä kärkivahvistusta kärjen poikkileikkauspinta-alan suurentuessa. Ulkopuolinen vaippavahvistus sen sijaan pienenee tiiviissä karkearakeisessa maakerroksessa tai moreenimaakerroksessa 50 % ja löyhässä 25 %.

- o Kärkivahvistus on tavallisesti vähintään 100 mm leveä teräspanta, joka hitsataan paalun kärkeen vaipan ulkopinnalle (kuva 40).



Kuva 40. Kärkivahvistettu teräspaalu.

6.5 Jatkos

Teräsputkipaalujen jatkos suoritetaan asennushitsauksena. Jatkohitsaus voidaan suorittaa joko puikkohitsaus- tai kaasukaarimenetelmää käyttäen.

6.51 Hitsaussuunnitelma

- o Hitsauksesta laaditaan osana pohjarakennussuunnitelmaa yksityiskohtainen suunnitelma. Suunnitelmassa tulee käydä ilmi seuraavat asiat:

- selvitys perusaineen hitsattavuudesta
- hitsausolosuhteet
- mahdollisesti tarvittava esilämmitys
- hitsausjärjestys
- railon muodot ja railon viimeistely
- hitsausasennot
- hitsausmenetelmät ja -laitteet
- käytettävät lisäaineet: puikot, langat, jauheet ja suojakaasut
- palkojen lukumäärä ja järjestys (piirros)
- perustelut lisäaineiden, hitsausmenetelmän ja hitsausarvojen valinnalle (tarvittaessa menetelmäkokeet)
- hitsaajien pätevyys
- mahdollinen hitsien jälkikäsittely
- mahdollinen hitsattujen kappaleiden lämpökäsittely
- hitsausliitosten tarkastaminen.

Menetelmäkoetta ei yleensä vaadita, kun hitsaus perustuu lisä- tai perusainevalmistajien suosituksiin. Menetelmäkoe tulee tehdä, jos käytetty putkimateriaali tai lisäaine on sellainen, ettei aiempien esimerkiksi putken- tai lisäaineen valmistajan tekemien hitsauskokeiden perusteella voida osoittaa hitsausliitoksen täyttävän annettuja laatuvaatimuksia. Menetelmäkoe tehdään standardia SFS 3326 soveltuvien osien noudattaen.

6.52 Railomuodot

- o Teräsputkipaalujen hitsaaminen tapahtuu yleensä yhdeltä puolelta, jolloin railomuodon on oltava sellainen, että saavutetaan riittävä läpihitsautuminen ja mahdollisimman tasainen kupu putken sisäpuolelle. Railomuodot valitaan SFS 2143 tai SFS 4594 mukaan.

Tavallisimmin käytettyjä railomuotoja ovat $\frac{1}{2}$ V- ja V-railo. V-railon käyttöä suositellaan vaakahitsin ja $\frac{1}{2}$ V-railoa pystyhitsin hitsaamisessa.

6.53 Hitsauslisäaineen valinta

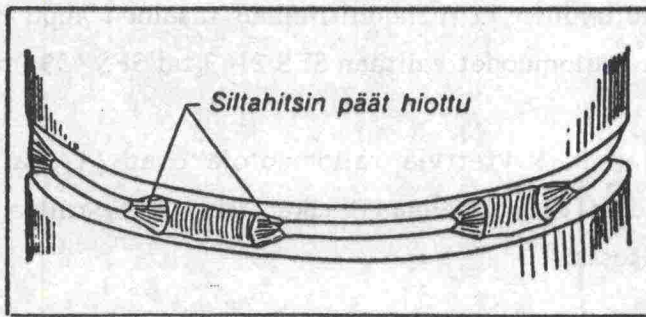
- o Hitsauslisäaine valitaan putkiraaka-aineen mukaan putken tai lisäainevalmistajan suosituksia noudattaen.

6.54 Putkien sovitus ja silloitus

- o Railon valmistuksen ja puhdistuksen jälkeen seuraa putkien sovitus hitsausta varten. Sovituksen huolellisuuteen ja oikein tehtyyn, kestävään silloitukseen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Putken epäpyöreys ja varsinkin sisähalkaisijoiden mittaerot aiheuttavat sovitusvaikeuksia. Jos juuripinnan korkeus vaihtelee huomattavasti, tämä on korjattava ennen sovitusta. Epäpyöreys ja/tai halkaisijaero aiheuttavat sen, ettei juurisärmiä saada samaan tasoon. Putkien huolellisella keskittämällä päästään parhaaseen ja useimmiten riittävän hyvään tulokseen. Sallittuna tasopoikkeamana pidetään enintään 1,6 mm, koska muuten sisempää juurisärmää ei varmuudella kyetä sulattamaan.

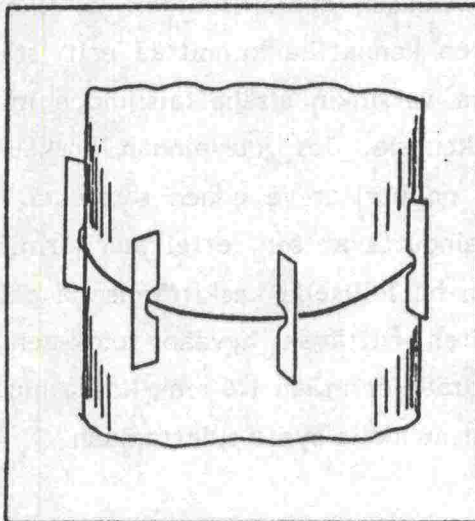
Ilmarakoa sovitettaessa on otettava huomioon silloituksen ja hitsauksen ilmarakoa supistava vaikutus. Mikäli raon suuruus vaihtelee, on huolehdittava, että se pienimmilläänkin täyttää läpihitsauksen edellytykset. Sovituksessa tulee pyrkiä käyttämään apulaitteita, jolloin silloitusta ei tarvita.

Paras silloitustapa on hitsata pitkä siltahitsi huolellisesti läpihitsaten ja jättää se osaksi pohjapalkoa (kuva 41). Siltahitsin päät on ohennettava virheettömän läpihitsauksen varmistamiseksi liittymäkohdissa. Lyhyiden siltahitsien hitsaamista suoraan raitoon ei suositella.



Kuva 41. Hitsiin jätettävä silloitus /10/.

Silloituksessa on usein edullista käyttää raiton kohdalta lovettuja sidepaloja. Tällaisen silloituksen etuna on, että palat auttavat raskaiden putkien sovituksessa ja hitsattava raito jää avoimeksi. Sidepalojen hitsaus on suoritettava siten, ettei putki vioitu silloituksen tai palan irrotuksen takia (kuva 42).



Kuva 42. Silloitus sidepaloilla /10/.

6.55 Hitsaus

- o Hitsaajien tulee olla standardin SFS 2218 mukaan pätevoityneitä vähintään WC U 3 pätevyystodistuksella. Hitsausolosuhteet on järjestettävä sellaisiksi, että suunnitelman mukainen laatutaso voidaan saavuttaa. Erityisesti raillojen ja lisäaineiden kuivana ja puhtaana pitämiseen on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Hitsausohjeet sekä vaaka- että pystyasentoiselle hitsaukselle on annettu viitteessä /10/.

6.56 Hitsausliitosten laatuvaatimukset ja tarkastus

- o Teräsputkipaalujen asennushitsien hitsiluokkavaatimuksena on WC U.

Hitsiluokka WC U On hyvää konepajakäytäntöä vastaava hitsiluokka, jonka ammattitaitoinen hitsaaja saavuttaa tavanomaisissa konepaja- tai asennusolosuhteissa.

Laadun saavuttaminen edellyttää huolellista hitsaussuunnitelmaa ja jatkuvaa laadunvalvontaa silmämääräisesti. Pistokoe- luontoisesti tai vian suuruuden selvittämiseksi käytetään myös magneettijauhe- tai tunkeumanestetarkastusta.

Päittäisliitoksista tulee tarkastaa pistokoe- luontoisesti 10 % ultraäänimenetelmällä tai röntgenkuvauksella.

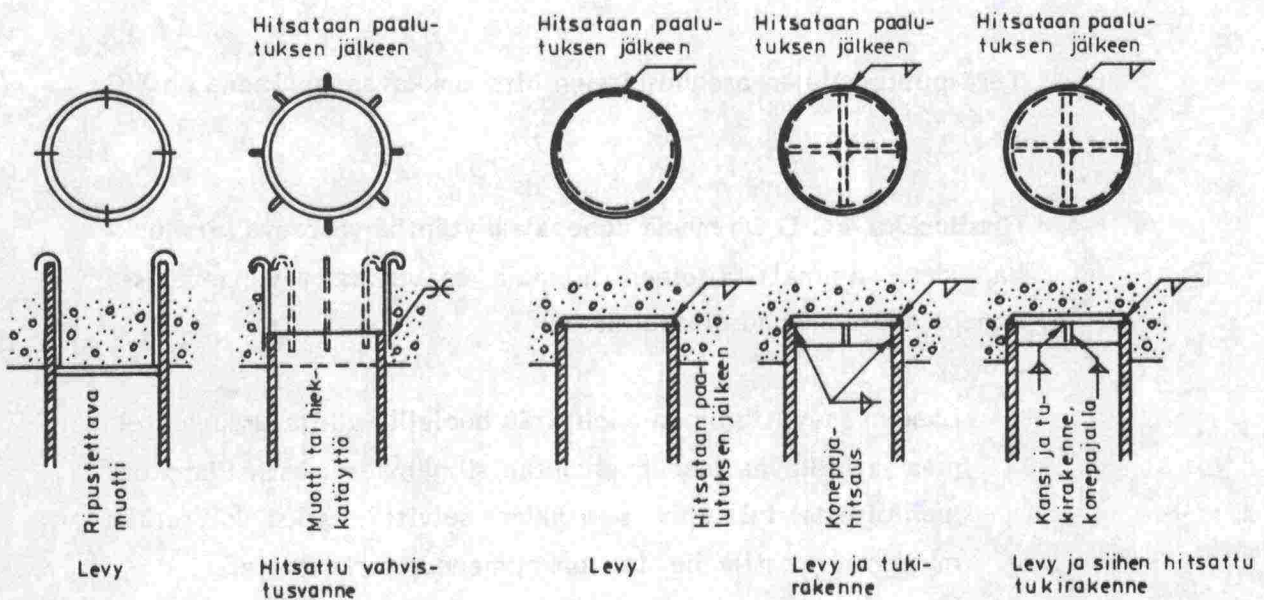
Laatuluokkaa käytetään hitseille, joiden lujuuden hyväksikäyttöaste on korkea, kuten muun muassa kantavat, dynaamisella kuormalla rasitetut rakenteet.

Väsymislujuusmerkki U tarkoittaa, että hitsin kuvun ja juuren tulee liittyä juoheasti perusaineeseen. Terävsärmäisiä pintavirheitä, kuten reunahaavaa, vajaata hitsautumissyvyyttä, avohuokosia ja imuonteloita ei sallita, sekä mahdolliset sytytysjäljet ja roiskeet poistetaan huolellisesti.

6.6 Yläpään kiinnitys betonirakenteisiin

Paalun yläpään ja betonirakenteen välinen liitos on suunniteltava siten, että se pystyy siirtämään kaikki betonirakenteelta paaluun kohdistuvat kuormat.

- o Tyypillisiä teräspalkkipaalin ja betonianturan välisiä liitoksia on esitetty kuvassa 43. Liittorakennepaalin ja teräskuorellisen betonipaalin liitos betonianturaan tehdään käyttäen betonirakenteiden välisiä tartuntateräksiä.



Kuva 43. Tyypillisiä teräspalkkipaalin ja betonianturan välisiä liitoksia /16/.

7. PAALUJEN SIIJOITUS

7.1 Keskinäiset etäisyydet paaluryhmissä

Paalujen pienimmät keskiöetäisyydet valitaan sellaisiksi, etteivät paalut vaikuta vähentävästi toistensa kantokykyyn, eivätkä lyötäessä vahingoita toisiaan.

- o Paaluryhmässä yhdensuuntaisten paalujen vaippapintojen lyhin etäisyys määritetään yleensä kaavan 37 mukaan.

$$e_{||} = 300 + 0,7 d \quad \text{mm} \quad (37)$$

$e_{||}$ = yhdensuuntaisten paalujen vaippapintojen välinen lyhin etäisyys

d = paalun halkaisija

Vaikeissa pohjasuhteissa on syytä pidentää etäisyyksiä. Paalujen ohjautuessa toisistaan, esimerkiksi tehtäessä putkipaaluseiniä laattikoperustuksia varten, voidaan edellä esitettyjä minimietäisyyksiä pienentää. Tällöin paalut on yleensä lyötävä kärjestä avoimina.

Mikäli paaluryhmä on alaspäin hajaantuva, voidaan paalujen yläpäätt sijoittaa pienemmin etäisyyksin kuin yllä on mainittu.

Kitka- ja koheesiopaaluryhmän osalta on lisäksi tarkistettava koko paaluryhmän kantavuus.

Mikäli paaluryhmässä on risteileviä paaluja, on risteilykohta pyrittävä suunnittelemaan mahdollisimman lähelle maanpintaa. Risteilevien paalujen minimietäisyys toisistaan riippuu paalujen risteilysyvyydestä. Minimietäisyys e_r määritetään yhtälöstä

$$e_r = l_r \cdot 50 \text{ mm/m} \geq e_{||} \quad (38)$$

e_r = risteilevien paalujen minimietäisyys toisistaan, mm

l_r = risteilysyvyys, m

Risteilevien kitka- ja koheesiopaalujen tulee kuitenkin kitka- ja koheesiopituudella sijaita vähintään edellä esitettyin minimietäisyyksin.

7.2 Etäisyydet muista rakenteista

Paalun minimietäisyydet viereisestä rakenteesta on kulloinkin määriteltävä erikseen. Ne riippuvat viereisen rakenteen kunnosta, rakenteesta ja perustamistavasta ja maapohjan oletettavissa olevista siirtymistä.

- o Arkojen rakenteiden vieressä on syytä käyttää kärjestä avoimia paaluja. Jos tulppautumista ei tapahdu, voidaan paalut lyödä kohdan 7.1 mukaisin etäisyyksin. Lyötäessä suljettua tai tulppaavaa paalua suurpaalujen vieressä on paalujen vaippapintojen lyhin etäisyys $2 d$, jossa d tarkoittaa lyötävän paalun halkaisijaa. Vastaavasti vaippapintojen välinen lyhin etäisyys betonipaaluryhmien vieressä on $3 d$, yksittäisten betonipaalujen vieressä $4 d$, puupaalujen, hoikkien teräspaalujen tai huonokuntoisen paalutuksen vieressä $5 d$. Jos uusi paalu lyödään vanhaa paalutusta syvemmälle, on vanhalle paalutukselle aiheutuvat painumat arvioitava erikseen.

7.3 Poikkeamat

Paalun asemalle ja suunnalle sallitut poikkeamat määritetään suurpaaluohjeen (SPO-78) kohdan 3.351 mukaan.

8. TERÄSPUTKIPAALUTUKSEN POHJARAKENNUSSUUNNITELMA

Teräspankkipaalutuksen pohjarakennussuunnitelma sisältyy osana kohteen pohjarakennussuunnitelmaan samoin periaattein kuin lyönti- tai suurpaalutuksen pohjarakennussuunnitelma.

- o Teräspankkipaalutuksen pohjarakennussuunnittelu etenee pääpiirteissään seuraavasti:

- 1) Määritetään pohjasuhteiden perusteella paalujen toimintatapa ja paalutyyppi sekä suunnitellun paalukuorman perusteella paalujen tavoitetaso ja koko.
- 2) Laaditaan teräspankkipaalutuksen pohjarakennussuunnitelma, jossa esitetään
 - yleinen työjärjestys
 - paalutyyppi ja paalujen koot
 - paalujen tavoitetasot
 - paalujen sallittu kantavuus
 - sallitut mittapoikkeamat
 - paalutusjärjestys
 - paalujen jatkaminen
 - kalliokärkien, pohjalevyjen, kärkivahvistusten yms. varusteiden käyttö
 - paalutuskalusto ja siltä vaadittava tehokas (paaluun siirtyvä) lyöntienergia
 - ohjeet kivisen ja lohkareisen täyttemaan läpäisystä
 - alustava loppulyöntiohje
 - paalutuksen aiheuttamien siirtymien tarkkailu ja niiden estämiseen tarvittavat toimenpiteet
 - ohjeet paalujen mahdollisen nousun tarkkailusta sekä alustavat ohjeet tarkistus- ja jälkilyönnistä
 - suoritettavat koekuormitukset
 - mahdollisen betonoinnin suoritus, betonin laatu, valun ja teräspankkin tarvittavan tartunnan aikaansaaminen, betonin tarvittava rauditus sekä tarkistusputkien käyttö ja sijoitus
 - ohjeet paalutuspöytäkirjan pitämisestä (pöytäkirjamalli liitteenä 1)

- 3) Kun käytettävä paalutuskalusto on tiedossa, tarkennetaan tarvittaessa loppulyöntiohjetta.
- 4) Kun koepaalutukset ja dynaamiset koekuormitukset on suoritettu kussakin pohjasuhteiltaan ja paalupituuksiltaan erilaisissa paikoissa, täsmennetään suunnitelma lopulliseksi erityisesti loppulyöntiohjeen osalta.
- 5) Geoteknisen ja rakenteellisen kantavuuden varmistamisen (vrt. 10.2 ja 10.3) jälkeen huolehditaan siitä, että Sillanrakennustöiden valvontaohjeen (SVO) kohdan 2.483 mukainen toteutumapiirustus tulee laadituksi.

9. PAALUTUSTYÖ

Paalutustyössä noudatetaan soveltuvin osin Sillanrakennuksen yleistä työselitystä (SYT).

9.1 Soveltuvat paalutuskalustot

Suurten teräsputkipaalujen lyöntiin soveltuvat hidasiskuiset juntat, joilla on paalujen haluttuun kantavuuteen nähden riittävä lyöntienergia niin, että paalujen kantavuus voidaan tarkistaa lyöntityön perusteella. Järkäleen lyöntikorkeus tai männän iskunopeus on oltava riittävä niin, että paalutustyö tulee tehokkaaksi, kun teräksen rakenteellinen kapasiteetti voidaan käyttää lyödessä hyväksi.

Paalujen, erityisesti teräskuorellisten betonipaalujen, upotus voidaan suorittaa myös täryjuntalla. Paalutettaessa täryjuntalla ei paalujen kantavuutta voida arvioida upotustyön perusteella.

Paalutuskalustojen on täytettävä LPO-87 kohdan 5.31 mukaiset yleisvaatimukset.

- o Hidasiskuisia junttia ovat pudotusjärkäleellä varustettu paalujuntta, dieseljuntta sekä yksitoimiset höyry- ja painellmajuntat. Paalujunttien mahdollinen lyöntikorkeus on oltava 1,5 - 2,0 m, jos järkäle putoaa vapaasti ja 2 - 2,5 m, jos järkäle on ripustettu vaijerilla. Teräsjännityksen hyväksi käyttö, mutta samalla pysyminen kappaleessa 5.211 esitetyissä rajoissa on tarkistettava järkäleen tai männän arvioidun iskunopeuden perusteella. Lyöntijännitysten mittaaminen dynaamisten koekuormitusten yhteydessä on kuitenkin suositeltavin tapa.

9.2 Lyönnin keskittäminen

Käytettäessä hidasiskuisia junttia on iskun keskistämiseksi ja paalun pään suojelemiseksi käytettävä iskutyynyä. Iskutyyny keskistetään pudotusjärkäleen ja paalun suhteen.

- o Iskutyyny keskistetään suoraan paalun päähän tulevan teräslevyn ohjaimien avulla. Iskutyynyn kehysosan, johon iskutyyny kiinnitetään lujasti kiilaamalla, tulee olla keskeisesti teräslevyyn kiinnitetty.

Iskutyönnyn sopiva materiaali on Azobe-puu. Iskutyönnyn poikkeileikkausala on oltava sama kuin järkäleessä. Iskutyönnyn sopiva pituus on 300 - 800 mm. Iskutyönnyn vaihdetaan ennen kuin lyönti osuu iskutyönnyn kehyksiin.

Täryjuntalla paalutettaessa on yläpää kiinnitettävä paaluun keskeisesti.

9.3 Lyöntienergian tarkistaminen

Paalutuslaitteen tehokas lyöntienergia eli energia, joka siirtyy paaluun, voidaan tarkistaa iskuaaltomittauksilla dynaamisten koekuormitusten yhteydessä.

- o Paaluun siirtyvän lyöntienergian tarkistaminen dynaamisten koekuormitusten yhteydessä on aina suositeltavaa. Kun käytetään vapaapudotusjärkäleitä ovat lyöntienergian häviöt pienimmillään. Sen sijaan erityisesti vanhojen diesel-junttien tehokas lyöntienergia saattaa poiketa huomattavasti valmistajan ilmoittamista arvoista. Samoin voivat vaijerilla ripustettujen järkäleiden energiahäviöt olla suuret. Ainakin näiden lyöntikalustojen tehokas lyöntienergia tulisi työmailla tarkistaa dynaamisten koekuormitusten yhteydessä.

9.4 Lyöntiohjeen laadinta

Suunnittelija laatii kullekin paalutyypin ja pohjasuhteiden yhdistelmälle pohjarakennussuunnitelmaan sisältyvät lyöntiohjeet, joita täsmennetään paalutuskalustoista saatujen tietojen sekä koepaalutusten ja koekuormitusten jälkeen.

- o Lyöntiohjeen laadinta etenee seuraavasti
 - 1) Suunnittelija laatii pohjasuhteiden, valitun paalutyypin ja -koon ja paalujen tavoitetason perusteella lyöntiohjeen, jossa esitetään alustavasti paalutustyön suoritus ja määrittellään lyöntikalustolta vaadittava tehokas lyöntienergia siten, että kappaleessa 4.13 esitettyjä paalutuskaavoja hyväksi käyttäen voidaan saada kohtuullinen loppulyöntivaatimus niin, että odotettavissa olevaksi murtokuormaksi tulee 2,5 - 3,0 kertaa sallittu geotekninen kantavuus. Suurin sallittu pudotuskorkeus H saadaan kaavan (35) avulla niin, että $\sigma_{\max} \leq 0,9 \sigma_{sa}$, kun σ_{sa} on paalumateriaalin myötöraja.

- 2) Urakoitsija valitsee kohteeseen soveltuvan lyöntikaluston siten, että vaadittava lyöntienergia saavutetaan sallittua pudotuskorkeutta pienemmällä pudotuskorkeudella ja ilmoittaa siitä tiedot suunnittelijalle.
- 3) Suunnittelija tarkentaa tarvittaessa lyöntiohjeen käytettävälle paalutuskalustolle.
- 4) Paalutustyön alkaessa suoritetaan koepaalutus ja mahdolliset koekuormitukset. Niiden perusteella suunnittelija laatii lopullisen lyöntiohjeen, josta ilmenee
 - ohjeet lyöntikorkeudesta tai käytettävästä lyöntienergiasta työn eri vaiheissa
 - ohjeet lyönnin lopettamisesta
 - menettelyohjeet lyönnin aikana odotettavissa olevien erityistekijöiden ilmenemisen varalta
 - ohjeet ilmoitusvelvollisuuksista ja täsmennetyt ohjeet paalutuspöytäkirjan pitämisestä (liite 1)
 - mahdolliset jatkossa suoritettavat koekuormitukset

10 PAALUTUSTYÖN VALVONTA

Paalutustöiden valvonnassa noudatetaan soveltuvin osin Sillanrakennustöiden valvontaohjetta (SVO).

10.1 Yhteenveto paalutustyönjohtajalle kuuluvista tehtävistä

- o Paalutustyönjohtajan tehtäviin kuuluu yleensä huolehtia mm. siitä, että
 - a) paalutustyösuunnitelma on laadittu ja hyväksytty
 - b) suunnitellut koepaalutukset ja dynaamiset koekuormitukset (PDA) tehdään ja paalujen lyöntiohjeet tarkistetaan
 - c) paalu täyttää valmistustoleransseja, paalun päiden kohtisuoruutta paalun akselia vastaan, kalliokärjen rakennetta ym. koskevat vaatimukset
 - d) kalliokärjen kärkitappi on kiinnitetty suunnitellulla tavalla
 - e) paalua käsitellään ja nostetaan asiaan kuuluvalla tavalla
 - f) paalu sijoitetaan suunnitellulle paikalle pystyyn tai suunniteltuun kaltevuuteen
 - g) paalun jatkoksen hitsausrailot ovat suunnitelman mukaiset ja hitsaus tehdään hitsaustöiden valvontaohjeiden mukaan sekä suunnitellut jatkosten tarkastukset tehdään ultraäänimittauksilla ja röntgenkuvauksina
 - h) järkäleen isku säilyy koko lyöntityön keskeisenä ja paalun suuntaisena
 - i) loppulyönnit lyödään lyöntiohjeen mukaisella pudotuskorkeudella
 - j) iskutyynyn puuosa vaihdetaan kyllin ajoissa
 - k) loppulyöntejä ei keskeytetä, ennen kuin paalun painuma täyttää lyöntiohjeessa annetun loppulyöntivaatimuksen
 - l) loppulyöntipainumat mitataan ja merkitään välittömästi paalutuspöytäkirjaan, jota pidetään jatkuvasti työsuorituksen aikana. Paalutuspöytäkirjat toimitetaan päivittäin geotekniselle suunnittelijalle (liite 1).
 - m) suunnitellut jouston mittaukset tehdään
 - n) suunnitellut dynaamiset koekuormitukset tehdään
 - o) aikaisemmin lyötyjen paalujen korkeusasemaa tarkkaillaan vaaituksilla koko sen ajan, kun paalutustyö on käynnissä näiden paalujen läheisyydessä. Mikäli havaitaan paalujen nousua, otetaan yhteyttä geotekniseen suunnittelijaan tarkistus- ja jälkilyöntiohjeiden saamiseksi.

- p) suunnitelman mukaiset ja geoteknisen suunnittelijan työn aikana määräämät tarkistus- ja jälkilyönnit tehdään
- q) paalujen sijainti ja kaltevuus mitataan
- r) betonoiduissa paaluissa tehdään tarvittavat tarkastukset vedenalaisen valun onnistumisen varmistamiseksi
- s) lisäpaalujen tarve tarkistetaan suunnittelijoilla. Geotekninen suunnittelija tarkastaa geoteknisen kantavuuden loppulyöntipainumien, tunkeutumisvyöhykkeiden ja dynaamisten koekuormitusten perusteella ja rakennesuunnittelija tarkastaa sen, etteivät paalujen suunnitelmasta poikkeavat sijainnit aiheuta paalukuormien lisääntymistä siten, että paalujen sallittu kantavuus ylittyy
- t) paalutustyö keskeytetään, jos lämpötila on alle -20°C , kun käytetään laatuluokan C materiaalia ja -25°C , kun käytetään laatuluokan D materiaalia.

Edellä esitettyä toimenpideluetteloja tulee tarpeen mukaan täydentää käytettävän paalutyypin, lyöntikaluston ja rakennuspaikan olosuhteiden mukaan, jotta voidaan varmistua siitä, että tavoiteltu paalun kantavuus saavutetaan.

10.2 Geoteknisen kantavuuden varmistaminen

Geoteknisen kantavuuden varmistamiseksi paalujen on saavutettava tavoitetasonsa, täytettävä loppulyöntiohjeessa niille asetetut vaatimukset ja niille on suoritettava määrätyt koekuormitukset. Tiedot paalujen tunkeumatasoista ja loppulyöntipainumista on toimitettava päivittäin paalutuspöytäkirjoina geotekniselle suunnittelijalle. Samoin geotekniselle suunnittelijalle ilmoitetaan joustomittauksien tulokset sekä tulokset dynaamisista koekuormituksista. Näiden tietojen perusteella geotekninen suunnittelija määrittelee paalujen todellisen geoteknisen kantavuuden ja päättää mahdollisesti lisäpaalujen tarpeesta.

- o Tarkimmin geotekninen kantavuus voidaan määrittää koekuormituksilla, joista suurille paaluille kysymykseen tulevat lähinnä dynaamiset koekuormitukset. Dynaamiset koekuormitukset (kullakin pohjasuhteitaan ja paalupituudeltaan erilaisella paikalla) tulisi suorittaa paalutustöiden alkaessa, jotta paalutustöiden suunnitelma ja erityisesti loppulyöntiohje saadaan tarkennettua niin, että paalujen suunniteltu kantavuus voidaan saavuttaa

10.3 Rakenteellisen kantavuuden varmistaminen

Rakenteellisen kantavuuden varmistamiseksi selvitetään, että paalu on riittävän suora ja ehjä, että jatkokset on hitsattu ja tarkastettu asiaan kuuluvalla tavalla, että paalun sisään mahdollisesti tuleva betonivalu on tehty suunnitellulla tavalla. Lisäksi on varmistuttava, että paalujen sijainnit täyttävät niille asetetut vaatimukset. Myöskin vedenalaisen betonoinnin laatu on tarkastettava siten kuin se on suunnitelmissa edellytetty.

Tiedot edellä mainituista tarkistusmittauksista on aina välittömästi toimitettava rakennesuunnittelijalle, joka niiden perusteella määrittelee paalujen todelliset kuormat ja rakenteellisen kantavuuden sekä päättää mahdollisesta lisäpaalujen tarpeesta.

- o Paalujen jatkaminen tehdään hitsaamalla. Hitsausliitokset tarkastetaan röntgenkuvauksilla ja ultraäänimittauksilla. Tarkastukset tehdään suunnitelmassa määrätyllä tavalla ja määrätyssä laajuudessa.

Paalun sisäpuolisen betonivalun onnistuminen voidaan tarkastaa esimerkiksi ultraäänimittauksilla paaluun asennetuista tarkistusputkista. Tarkastus on kuitenkin tarpeen ainoastaan silloin, kun paalu on upotettu kärkeä avoimena ja valu suoritetaan vedenalaisena. Tarkastus on tarpeellisin teräskuorellisessa betonipaaluksa. Tällöinkin ultraäänimittausten tarpeellisuus määritetään suunnittelijan harkinnan mukaan.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ Heikkilä, J., Putkipaalumerkkien geotekninen mitoitus. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 1988.
- /2/ Hyrkkönen, A., Diplomityö: Suuren teräsputkipaalun geotekninen kantavuus. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 1988.
- /3/ Löyntipaalutusohjeet 1987. Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry. Helsinki 1987.
- /4/ Maa- ja kalliorakennus. RIL 98. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki 1976.
- /5/ Matlock, Hudson, Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay. Second Annual Offshore Technology Conference. Houston, Texas 1970.
- /6/ Meyerhof, G.G., Bearing capacity and settlement of pile foundations. Journal of the geotechnical engineering division. ASCE 102, 3. s. 197 - 228. 1976.
- /7/ Meyerhof, G.G., Theory and practice of pile foundations. Proc. of the Int. Conf. on deep foundations. Vol. 2. Beijing 1986.
- /8/ Meyerhof, G.G., Valsanghar, A.J., Bearing capacity of piles in layered soils. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Vol. 2. Tokio 1977.
- /9/ Poulos, H.G., Davis, E.H., Pile foundation analysis and design. John Wiley and Sons, New York 1980.
- /10/ Putkistohitsauksen suoritustekniikka MET tekninen tiedotus 37/84.
- /11/ Ray W. Clough, Joseph Penzien, Dynamics of Structures. McGraw-Hill. New York 1975.
- /12/ Slunga, E., Paalun geoteknillisen kantavuuden määrittäminen. Teräspaalojen suunnittelu ja käyttö. RIL k 75 - 1987.
- /13/ Steel pipe piles design. Japanese Association for Steel Pipe Piles. Tokio 1982.

- /14/ Teräspaalujen suunnittelu ja käyttö. Japanese Association for Steel Pipe Piles. 1985.
- /15/ Teräsrakenteet I. RIL 167-1.
- /16/ Törnqvist, J., Teräspaalujen korroosio. Teräspaalujen suunnittelu ja käyttö. RIL k 75 - 1987.
- /17/ Veiledning ved pelefundamentering. Norges Geotekniske Institut. Oslo 1973.
- /18/ Teräsrakenneohjeet. THV 723449.
- /19/ Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeen B4. Betonirakenteet soveltaminen sillansuunnittelussa. TVH 722073.
- /20/ Peleveiledningen. Norges Byggstandardiseringsråd. Oslo 1987.

Työkohde:	Paalu n:o
Paikka:	Pöytäkirja n:o sivu n:o /

TERÄSPUTKI

Ø	ulko =	mm	seinämävahvuus =	mm	pituus ≈	mm	paino ≈	kN
osa	teräslaatu		valmistaja		valm.pvm		todistukset ja huomautukset	
putki								
kärki								
jatkos								

Putken toleranssit:

Ulkohalkaisija	_____ %	ympärysmitta	Seinämäpaksuus	_____ %
Suoruus	_____ %	pituudesta	Pituus	_____ mm
Pyöreys	_____ %		Pään tasomaisuus	_____ mm
Pään suorakulmaisuus	_____ %	ulkohalkaisijasta tai _____ mm		

TERÄSPUTKEN UPOTUS ALKOI: PVM KLO PÄÄTTYI: PVM KLO

[illegible]

PUTKEN UPOTUKSEN LISÄLEHTI

LIITE 2

Työkohte:	Paalu n:o
Paikka:	Pöytäkirja n:o

TERÄSPUTKEN UPOTUS (JATKOA)

[illegible]

KAIVU, MAAPERÄTIEDOT JA TYÖAJAT

Kerros- paksuus	Maalajien rajat	Maalaji	Tehokas työaika	Huomautuksia (kaivukalusto, (näytteet, lohkareet, keskeytykset, yms.)
_____	Mittaustaso		Työ alkoi:	
m			h	
m			h	
m			h	
m			h	
m			h	
m			h	
m	Pohjan taso		h	
Tulpan paksuus			Työ päättyi:	Pohjan käsittely:
m				
Tehokas työaika yhteensä			h	Kokonaistyoaika: h

RAUDOITUS JA BETONOINTI ALKOI: PVM KLO PÄÄTTYI: PVM KLO

Pohjan tarkastus: pvm	klo	Pohjan hyväksyminen, tarkastaja:
Tehdyt puhdistustoimenpiteet:		
Raudoitus, pääteräkset:	haat:	Tarkistusputket:
Betonin valmistaja:		Lujuusluokka K
Sementtimäärä:	kg/m ³	Suurin raekoko: mm Notkeus: sVB
Vesisementtisuhte:	Lisäaineet:	
Betonimenekki: todellinen:	m ³	teoreettinen: m ³ Koekappaleet (tunnus):
Betonointitapa:	Lämpötila C°	
Betonoinnin keskeytys klo	korkeustasossa +	
Syy keskeytykseen:		

ERIKOIS- JA KORJAUSTOIMENPITEET

TARKISTUSMITTAUKSET

Tarkistukset	Suunniteltu	Poikkeama / mitattuarvo	Paalun pään korkeustaso lyönnin jälkeen - _____
Sijainti	<input type="checkbox"/>	Δ X =	Tarkistusvaaitus, pvm _____, korkeus - _____
Käyryys	< 1:	Δ Y =	Tarkistus / jälkilyönti pvm - _____
Suunta	<input type="checkbox"/>	_____	Paalun katkaisutaso - _____
Kaltevuus	<input type="checkbox"/>	_____ : 1 _____	Laatinut: _____ / _____ 19 _____